



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## VLIV POZICE SVÍTIDLA UVNITŘ KULOVÉHO INTEGRÁTORU NA VÝSLEDKY MĚŘENÍ

LUMINAIRE POSITION INFLUENCE ON MEASURED PARAMETERS IN INTEGRATING  
SPHERE.

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Vlček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Pavel Vlček

**ID:** 195461

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

**Vliv pozice svítidla uvnitř kulového integrátoru na výsledky měření**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Téma je zaměřeno na měření světelně technických parametrů svítidel v závislosti na jejich poloze uvnitř kulového integrátoru a porovnání těchto výsledků s měřením na goniofotometru. Práce by se měla zabývat nastudováním problematiky měření v kulových integrátorech pro svítidla s nerovnoměrnou vyzařovací charakteristikou, měřením potřebného množství dat pro vybraná svítidla v určitých polohách a jejich následujícím zpracováním a vyhodnocením. Kritérium pro výběr studenta bude nutná osobní konzultace s vedoucím s přihlédnutím ke studijnímu průměru.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.05.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Motyčka

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **Bibliografická citace práce:**

VLČEK, Pavel. *Vliv pozice svítidla uvnitř kulového integrátoru na výsledky měření* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119174>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vliv pozice svítidla uvnitř kulového integrátoru na výsledky měření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.“

V Brně dne: 27.5.2019

.....

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Motyčkovi za odborné vedení, za pomoc s návrhem konstrukcí pro svítidla a následným měřením v laboratoři světelné techniky a také za cenné rady při zpracování této práce.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem polohy svítidel s úzkou vyzařovací charakteristikou při měření v kulovém integrátoru. K proniknutí do dané problematiky jsou zde shrnuty základní světelně technické parametry. Zejména světelný tok, osvětlenost, prostorový úhel, svítivost a jas, následuje teplota chromatičnosti a index podání barev. Dále se práce zabývá měřicími přístroji. Základním prvkem, kterým je fotočlánek a poté na to navazujícími přístroji: luxmetr, jasoměr, spektrometr, goniofotometr a kulový integrátor. Práce také shrnuje základní informace o svítidlech. Po této teorii následuje laboratorní měření, které se zabývá měřením svítidel na goniofotometru, a v kulovém integrátoru. Měření na goniofotometru, je důležité z hlediska získání přesného světelného toku. Světelný tok z goniofotometru se porovná s jednotlivými naměřenými hodnotami v nastavovaných polohách při měření v kulovém integrátoru. Výsledkem je získat vliv polohy svítidla v kulovém integrátoru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

světelný tok; osvětlenost; prostorový úhel; svítivost; jas; kulový integrátor; goniofotometr; svítidlo

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the influence of the position of luminaires with narrow radiation characteristics when measured in the integrating sphere. The basic light technical parameters are summarized here. Especially, luminous flux, illuminance, solid angle, luminous intensity and luminance, followed by colour temperature and general colour rendering index. This thesis also deals with the measuring instruments. Basic element, which is the photoelement and then with the following instruments: the illuminance meter, the luminance meter, the spectroradiometer, the goniophotometer and the integrating sphere. The thesis also includes the basic information about luminaires. This theory is followed by a laboratory measurement that deals with the measurement of narrow beam luminaires on a goniophotometer and in the integrating sphere. Goniophotometer measurements are important in conditions of acquiring accurate luminous flux. The luminous flux from the goniophotometer is compared with the single measured values in the set positions when measured in the integrating sphere. As a result, the position of the luminaire in the integrating sphere is influenced.

## **KEY WORDS:**

luminous flux; illuminance; solid angle; luminous intensity; luminance; integrating sphere; goniophotometer; luminaire

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
ÚVOD.....	13
1 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY SVÍTIDEL .....	14
1.1 SVĚTELNÝ TOK .....	14
1.1.1 Zářivý tok $\Phi_e$ .....	14
1.1.2 Spektrální hustota zářivého toku $\Phi_{e\lambda}$ .....	15
1.1.3 Poměrná světelná účinnost $V_\lambda$ .....	15
1.2 OSVĚTLENOST .....	17
1.3 PROSTOROVÝ ÚHEL .....	19
1.4 SVÍTIVOST.....	20
1.5 JAS.....	22
1.6 DALŠÍ PARAMETRY A VLASTNOSTI SVĚTELNÝCH ZDROJŮ .....	23
1.6.1 Teplota chromatičnosti a neutrální teplota (4000 K).....	23
1.6.2 Měrný výkon .....	24
1.6.3 Index podání barev $R_a$ .....	25
1.6.4 Životnost světelných zdrojů.....	26
2 FOTOMETRICKÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE .....	27
2.1 ÚVOD K FOTOMETRICKÉMU MĚŘENÍ .....	27
2.2 FOTOELEKTRICKÝ ČLÁNEK.....	27
2.3 FOTODIODA .....	28
2.4 LUXMETR .....	29
2.5 JASOMĚR.....	30
2.6 SPEKTORADIOMETR .....	31
2.6.1 Konstrukce .....	31
2.6.2 Funkce spektrometru.....	31
2.6.3 Jak vybrat správnou mřížku .....	32
2.6.4 CCD-princip .....	32
2.7 GONIOFOTOMETR .....	33
2.7.1 Typy A/ B/ C .....	34
2.7.1.1 Typ A.....	34
2.7.1.2 Typ B.....	34
2.7.1.3 Typ C.....	34
2.7.2 Měření křivek svítivosti .....	35
2.8 KULOVÝ INTEGRÁTOR.....	36
2.8.1 Teorie kulového integrátoru.....	36
2.8.1.1 Multiplikační koeficient .....	38
2.8.1.2 Časové zpoždění kulového integrátoru.....	38
2.8.2 Velikost kulového integrátoru.....	38
2.8.3 Rovnoměrnost vnitřního povrchu (uniformita) .....	39
2.8.4 Zdroje chyb.....	40
2.8.4.1 Geometrické .....	40
2.8.4.2 Absorpce světla.....	40
2.8.4.3 Linearita .....	40
2.8.4.4 Elektrické měření .....	40

<b>3 SVÍTIDLA .....</b>	<b>41</b>
3.1 VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY / SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY .....	41
3.2 ENERGETICKÁ NÁROČNOST.....	42
3.2.1 Účinnost .....	42
3.2.2 Měrný výkon .....	42
3.3 VZHLED.....	42
3.4 TŘÍDĚNÍ A KLASIFIKACE .....	43
3.4.1 Technické svítidla .....	43
3.4.1.1 Svítidla pro všeobecné osvětlování.....	43
<b>4 LABORATORNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>45</b>
4.1 MÍSTO MĚŘENÍ.....	45
4.2 MĚŘENÁ SVÍTIDLA.....	45
4.2.1 Výroba konstrukce pro uchycení svítidla k měření na goniofotometru.....	45
4.3 MĚŘENÍ NA GONIOFOTOMETRU .....	46
4.3.1 Upevnění svítidel na goniofotometru.....	46
4.3.2 Postup měření na goniofotometru.....	47
4.4 MĚŘENÍ V KULOVÉM INTEGRÁTORU .....	49
4.4.1 Uchycení kolimátoru v kulovém integrátoru.....	49
4.4.2 Postup měření kolimátorem.....	49
4.4.3 Schéma měření.....	50
4.4.3.1 Seznam přístrojů: .....	50
4.4.3.2 Kalibrace přístrojů:.....	50
4.4.4 Záznam teploty, při měření kolimátoru v kulovém integrátoru .....	51
4.4.5 Postup měření svítidel v kulovém integrátoru .....	52
4.4.6 Roviny $C$ a $\gamma$ .....	52
4.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	53
4.5.1 Původní povrchový graf v programu Matlab .....	53
4.5.2 Uniformita kulového integrátoru .....	54
4.5.3 Srovnání měřených bodů s goniofotometrem.....	55
4.5.3.1 Měření svítidla White LED 18° v kulovém integrátoru .....	55
4.5.3.2 Měření svítidla RGB LED 16° v kulovém integrátoru .....	56
4.5.3.3 Měření svítidla RGB LED 7° v kulovém integrátoru .....	57
4.5.3.4 Výpočet odchylky kulového integrátoru od goniofotometru .....	57
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>58</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>59</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Historie světelného toku [8].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Průběhy poměrné spektrální citlivosti oka [1] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Příklad jasů pro určité oblasti vidění [6] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4 Osvětlenost [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5 Intenzita osvětlení [9] .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 6 Definice bodového zdroje světla [2] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7 Prostorový úhel [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8 Svítivost [7] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 9 Diagram svítivosti [7].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 10 Systém řezu polorovin C-<math>\gamma</math> [1] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 11 Jas odražený od plochy [7].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 12 Definice jasů [2] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 13 Teplota chromatičnosti [10] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 14 Index podání barev [11, upraveno] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 15 Barevné spektrum světla [11] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 16 složení fotočlánku [1] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 17 odchylky měření fotočlánku v závislosti na úhlu [12] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 18 Schématická značka fotodiody [14] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 19 Rovinný luxmetr s fotočlánkem [2] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 20 Jasoměr – LS100 [2].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 21 Princip objektivního jasoměru [12].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 22 Složení spektrometru [22, upraveno] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 23 CCD princip [17].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 24 Goniofotometr Rigo801 [26] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 25 Goniofotometr Typu A [15] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 26 Goniofotometr Typu B [15] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 27 Goniofotometr Typu C [15] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 28 prostorový úhel v polárních souřadnicích [20] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 29 Prostorový úhel kulového vrchlíku a pásu [20].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 30 Schéma kulového integrátoru [18] .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 31 Uvažování ztrát přes otvory v kulovém integrátoru [21].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 32 Mapování odezvy kulového integrátoru [24].....</i>	<i>39</i>

<i>Obr. 33 Vyzařování svítidla v soustavě fotometrických rovin C-<math>\gamma</math> [1]</i>	41
<i>Obr. 34 Svítidlo [23]</i>	42
<i>Obr. 35 Třídění technických svítidel [1]</i>	43
<i>Obr. 36 Třídění svítidel pro všeobecné osvětlování [1]</i>	43
<i>Obr. 37 Klasifikace svítidel podle činitele tvaru křivky [27]</i>	44
<i>Obr. 38 Klasifikace svítidel podle BZ křivek [27]</i>	44
<i>Obr. 39 a) Hliníkové díly pro konstrukci svítidel b) Sestavená konstrukce se svítidlem</i>	45
<i>Obr. 40 a) Konstrukce b) Uchycení konstrukce c) Zapnuté svítidlo v konstrukci</i>	46
<i>Obr. 41 a) Měření na goniofotometru-pohled z boku b) měření na goniofotometru-pohled zepředu</i>	47
<i>Obr. 42 Prostorové rozložení zářivého toku White LED 18°</i>	48
<i>Obr. 43 Prostorové rozložení zářivého toku RGB LED 16°</i>	48
<i>Obr. 44 Prostorové rozložení zářivého toku RGB LED 7°</i>	48
<i>Obr. 45 a) Kolimátor b) Měření spodní polokoule c) Měření vrchní polokoule</i>	49
<i>Obr. 46 Schéma měření s kolimátorem</i>	50
<i>Obr. 47 Teplota při měření vrchní polokoule</i>	51
<i>Obr. 48 Teplota při měření spodní polokoule</i>	51
<i>Obr. 49 a) Svítidlo v kulovém integrátoru b) Konstrukce pro natáčení svítidel</i>	52
<i>Obr. 50 Kulový integrátor s průměrem 2,5 m</i>	52
<i>Obr. 51 Původní povrchový graf v programu Matlab</i>	53
<i>Obr. 52 a) Nepohyblivá polokoule b) Pohyblivá polokoule se spektrometrem</i>	54
<i>Obr. 53 Povrchový graf kulového integrátoru</i>	54
<i>Obr. 54 Povrchový graf s polohováním White LED 18°</i>	55
<i>Obr. 55 Povrchový graf s polohováním RGB LED 16°</i>	56
<i>Obr. 56 Povrchový graf s polohováním RGB LED 7°</i>	57

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti různých zdrojů světla [2] .....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2 Přehled měrných výkonů komerčně dostupných světelných zdrojů (2019) [2].....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3 Orientační životnost světelných zdrojů (2019) [2].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4 Rozdělení přesnosti parametrů světelně technických veličin [1].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5 parametry vrypů na difrakční mřížce 2019 Avantes [22] .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 6 Klasifikace svítidel podle činitele tvaru křivky [1,27] .....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 7 Měření na goniofotometru.....</i>	<i>47</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Symbole

Značka	Jednotka	Slovní význam
$\phi$	lm	Světelný tok
$\Phi_e$	W	Zářivý tok
$V(\lambda)$	-	Poměrná světelná účinnost
$L$	$\text{cd.m}^{-2}$	Jas
$N$	-	Index lomu
$c_0$	$\text{m.s}^{-1}$	Rychlost světla ve vakuu
$f$	Hz	Frekvence
$\lambda$	nm	Vlnová délka
$K$	$\text{lm.W}^{-1}$	Světelná účinnost zdroje
$E$	lx	Osvětlenost
$A$	$\text{m}^2$	Plocha
$l$	m	vzdálenost
$\Omega$	sr	Prostorový úhel
$r$	m	Poloměr
$I$	cd	Svítivost
$T_c$	K	Teplota chromatičnosti
$\eta_z$	$\text{lm.W}^{-1}$	Měrný výkon zdroje
$\eta_{sv}$	$\text{lm.W}^{-1}$	Měrný výkon svítidla
$P$	W	Příkon
$R_a$ (CRI)	-	Index podání barev
$T_z$	h	Životnost světelných zdrojů
$d$	m	Průměr
$M$	-	Multiplikační koeficient
$R_{LO}$	-	Provozní účinnost svítidla
$t$	s	Čas
$\tau$	s	Časová konstanta
$\rho$	-	Odraznost
$f_i$	-	Část ztracená v drážkách otvoru
$M$	-	Multiplikační koeficient
$\eta$	- (%)	Účinnost

$T(\lambda)$	-	Propustnost filtru
$S_o(\lambda)$	-	Spektrální rozložení svítidla mimo kulový integrátor
$S_i(\lambda)$	-	Spektrální rozložení svítidla v kulovém integrátoru

### Zkratky

Zkratka	Český význam zkratky
CCT	Náhradní teplota chromatičnosti
LED	Dioda vyzařující světlo
UV	Ultra fialové záření
IČ	Infra červené záření
CCD	Zařízení s vázanými náboji
VIS	Viditelná oblast
NIR	Blízko infračervenému světlu
BZ	British zone – Britský systém
LOR	Provozní účinnost svítidel

# ÚVOD

Tato bakalářská práce se zaměřuje na téma zjištění vlivu polohy svítidel s úzkou vyzařovací charakteristikou a následným porovnáním naměřených hodnot světelného toku na goniofotometru, jehož výsledky považujeme jako přesné. Práce poskytne přehled o problematice měření v různých polohách svítidla umístěného v kulovém integrátoru. Pro lepší představu o problematice jsou v této práci popsány světelně technické parametry, jako je světelný tok, osvětlenost, prostorový úhel, svítivost a jas. Dále jsou v práci popsány také další základní údaje, které se o svítidlech udávají jako jsou teplota chromatičnosti a indexem podání barev. Dalším bodem jsou měřicí přístroje. Začneme základním prvkem, kterým je fotočlánek, po kterém následují luxmetr, jasoměr, spektorradiometr, goniofotometr a kulový integrátor. V práci jsou obsaženy také základní informace o svítidlech. Následuje uvedení do problematiky měření na goniofotometru a kulového integrátoru, u kterého jsou rozepsány jeho možné chyby při měření. Tyto informace slouží jako podklad pro měření na goniofotometru a kulovém integrátoru. Dalším bodem práce je samotné měření, ke kterému je potřeba vyrobit konstrukce na uchycení svítidel pro goniofotometr a následně kulový integrátor. Po změření vyzařovací charakteristiky a světelného toku na goniofotometru následuje měření uniformity pomocí kolimátoru v kulovém integrátoru. Pomocí tohoto měření dostaneme informaci o celkovém vnitřním povrchu kulového integrátoru. Přesněji v jakých oblastech budou měřená svítidla přeměřovat, podměřovat, nebo měřit s malou chybou v porovnání s výsledky na goniofotometru. Data budou zpracována do povrchových grafů, aby bylo zřejmé, kam bylo se svítidlem mířeno a jaké hodnoty s jakou odchylkou od hodnot goniofotometru byly při měření zjištěny. Výsledkem práce je zjištění vlivu polohy svítidel s úzkou vyzařovací charakteristikou v kulovém integrátoru na výsledky měření světelného toku.

# 1 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY SVÍTIDEL

Aby byly lépe pochopeny souvislosti a snadněji se orientovalo v následujících kapitolách, budou v této kapitole popsány světelné technické parametry. S některými z nich se setkáváme třeba v obchodě při koupi nového zdroje světla, třeba LED žárovky.

## 1.1 Světelný tok

Světelný tok se řadí do světelně technických veličin. Jeho jednotkou je lumen ( $lm$ ) a značí se  $\phi$ . Vyjadřuje, kolik světelné energie vyžáří zdroj do okolí [2]. Ze vztahu (1.1) vyplývá, že světelný tok  $\phi$  závisí na zářivém toku  $\phi_e$  a veličině  $K$ , což je světelný účinek monochromatického záření, který je shodný se světelným tokem a jemu odpovídajícím zářivým tokem. Obvykle se vyjadřuje součinem poměrné světelné účinnosti  $V(\lambda)$  a maximální hodnoty  $K_m$  spektrálního průběhu veličiny  $K$ . Všechny dané veličiny jsou vztaženy k monochromatickému záření vlnové délky  $\lambda$ , tedy pro  $K(\lambda)$  platí  $K(\lambda) = K_m V(\lambda)$  [1].

Pro světelný tok  $\phi(\lambda)$  platí vztah:

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \phi_e(\lambda) = K_m V(\lambda) \phi_e(\lambda) \quad (lm; lm \cdot W^{-1}, -, W) \quad (1.1)$$

### 1.1.1 Zářivý tok $\phi_e$

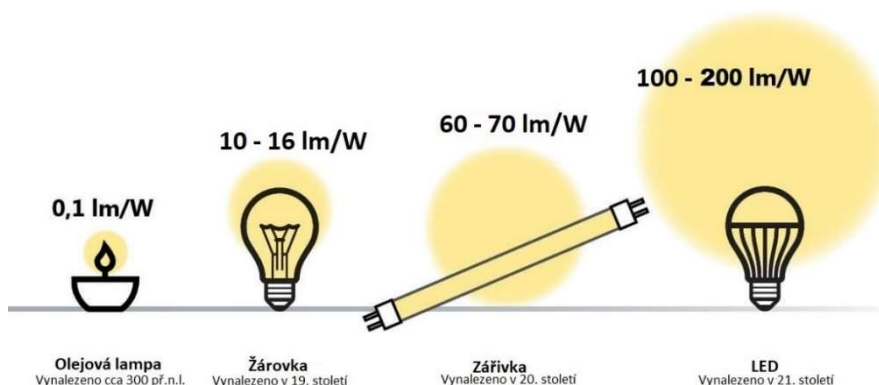
Zde se dostáváme k rozdílu radiometrických a fotometrických veličin, kde odpovídá světelný tok zářivému toku, a v dalších kapitolách se rozebere problematika dalších veličin, které jsou svítivost, která odpovídá zářivosti, a osvětlení, které odpovídá intenzitě vyzařování [3].

Zářivý tok představuje celkovou energii vyzařenou zdrojem za jednotku času. Dostaneme vztah [3]:

$$\phi_e = \frac{dE}{dt} \quad (W; J, s^{-1}) \quad (1.2)$$

$E$  je vyzařená energie.

### Historie světelného toku



Obr. 1 Historie světelného toku [8]

### 1.1.2 Spektrální hustota zářivého toku $\phi_e(\lambda)$

Když se jedná o spojité záření složené z různých monochromatických záření, určí se zářivý tok pomocí vztahu:

$$\phi_e = \int_0^{\infty} \phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \approx \sum_{i=1}^n (\phi_{e\lambda})_i \Delta\lambda_i \quad (lm.W^{-1}; lm.W^{-1}) \quad (1.3)$$

V další podkapitole se vysvětlí, proč tomu tak je. Nyní stačí vědět, že při fotopickém (denním) vidění je při  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$  možné dostat maximálně  $683 \text{ lm.W}^{-1}$  [2].

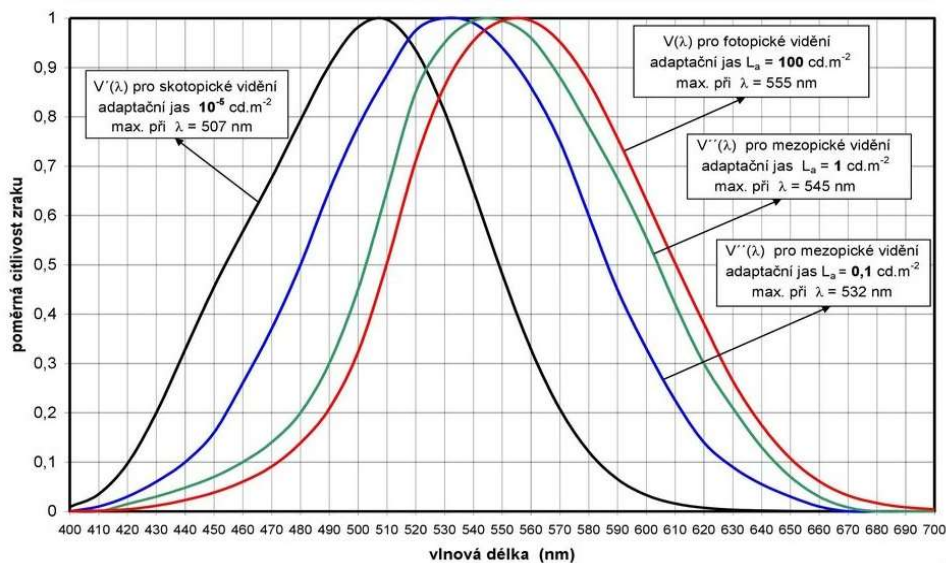
Výpočet světelného toku pro záření složené z různých monochromatických záření, jehož zářivý tok  $\phi_e(\lambda)$  vyjadřuje velikost pro danou vlnovou délku, se zjistí z následující rovnice [1]:

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} \left( \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) V(\lambda) d\lambda \quad (lm; lm.W^{-1}, W.m^{-2}, m) \quad (1.4)$$

### 1.1.3 Poměrná světelná účinnost $V(\lambda)$

Vyjadřuje se vztahem:

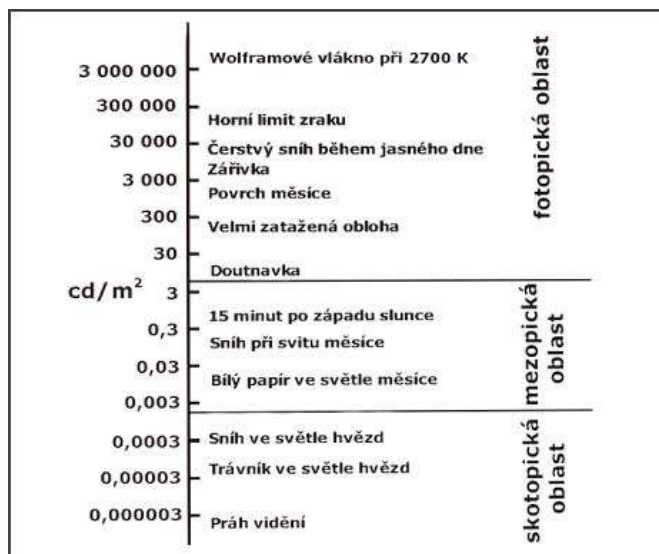
$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (-; lm.w^{-1}, lm.w^{-1}) \quad (1.5)$$



Obr. 2 Průběhy poměrné spektrální citlivosti oka [1]



Mezi krajními hodnotami skotopického a fotopického vidění se nachází mezopické vidění se kterým se lze setkat 15 minut po západu slunce, sníh při svitu měsíce, nebo na bílém papíru při světle měsíce (viz obr. 3). Znázorněno v grafu (obr. 2) pro adaptační jas  $L_a = 0,1$  a  $1 \text{ cd.m}^{-2}$  [1].



Obr. 3 Příklad jasů pro určité oblasti vidění [6]

Rychlost světla  $c$  přepočítaná na standardní prostředí, kdy je teplota  $20^\circ\text{C}$ , relativní vlhkost 50 %, tlak  $1\,013,247\,2 \text{ hPa}$  a index lomu  $N = 1,000\,279\,668$ . Na základě přepočtu z rychlosti světla ve vakuu  $c_0 = 2,997\,924\,59 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ , vyjde  $c$  následně dosazené v dalším vztahu [1].

$$c = \frac{c_0}{N} = \frac{2,997\,924\,59 \cdot 10^8}{1,000\,279\,668} = 2,997\,086\,40 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad (\text{m.s}^{-1}; \text{m.s}^{-1}, -) \quad (1.6)$$

Pro frekvenci zdroje  $f = 540 \cdot 10^{12} \text{ (Hz)}$ , což je hodnota, při níž je zářivost zdroje v jednom směru  $1/683 \text{ (W.sr}^{-1}\text{)}$ , kdy výsledným podělením hodnot se dostane hodnota pro  $\lambda_m$  za normálního denního vidění [1].

$$\lambda_m = \frac{c}{f} = \frac{2,997\,086\,40 \cdot 10^8}{540 \cdot 10^{12}} = 555,015\,5 \text{ nm} \quad (\text{nm}; \text{m.s}^{-1}, \text{Hz}^{-1}) \quad (1.7)$$

Orgány CIE a ISO schválily, že s definicí kandely je maximum světelné účinnosti na watt pro monofrekvenční záření základní vlnové délky  $\lambda_m = \lambda = 555,015\,5 \text{ nm}$ , které dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při denním (fotopickém) vidění hodnoty  $K_m = 683 \text{ lm.w}^{-1}$ . Lze získat maximálně 683 lumenů z jednoho wattu, při vlnové délce  $555 \text{ nm}$ . Tato konstanta spojuje optickou radiometrii a fotometrii, jelikož je hodnota  $K$  (555) stejná jak pro fotopické, tak pro skotopické vidění. Na tomto základě se může pracovat se světelnými toky v lumenech [1].

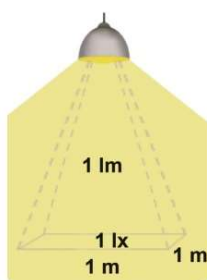
Fotopické vidění má své maximum na vlnové délce  $555 \text{ nm}$ , které je  $683 \text{ lm.W}^{-1}$ . Zatímco skotopické vidění má své maximum na vlnové délce  $507 \text{ nm}$ , a pro tuto hodnotu má velikost  $1\,700 \text{ lm.W}^{-1}$ .

## 1.2 Osvětlenost

Osvětlenost neboli intenzita osvětlení (illuminance) se značí  $E$ , a jeho jednotkou je lux ( $lx$ ). Jeho rozměr je  $1 lx = 1 lm \cdot m^{-2} = 1 cd \cdot sr \cdot m^{-2}$ , a udává hodnotu světelného toku, která dopadne na jednotkovou plochu ( $1 m^2$ ). Osvětlenost můžeme určit poměrem plošné hustoty světelného toku  $d\Phi_d$ , a plochou dopadlého světla  $dA$ , čímž dostaneme vztah [1]:

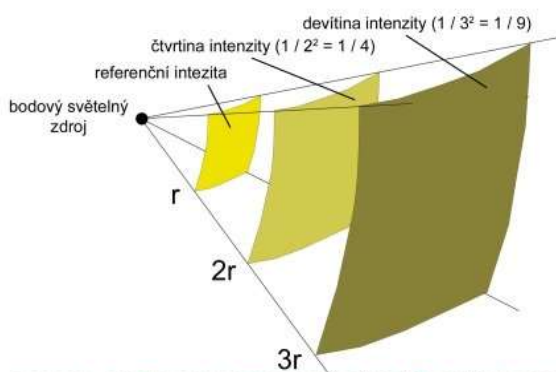
$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (lx; lm, m^2) \quad (1.8)$$

Ke vztahu lze uvést příklad na základě osvětlení pokoje, který má plochu  $7 \times 5$  metrů (tedy  $35 m^2$ ), a osvětluje ho světelný zdroj se světelným tokem  $7\,000 lm$ . Na základě těchto informací můžeme zjistit osvětlenost, která je rovna  $E = \Phi/A = 7000/35 = 200 lx$ . Tato hodnota by měla být dostatečná pro standardní obytný pokoj [1].



Obr. 4 Osvětlenost [2]

Můžeme vidět, že lumeny, které dopadnou na jednotkovou plochu o rozloze  $1 m^2$ , vytváří intenzitu osvětlení (viz obr. 4), která se udává v luxech [2]



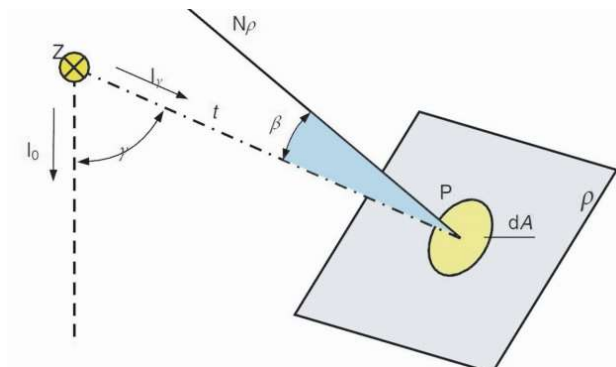
Obr. 5 Intenzita osvětlení [9]

Na obr. 5 vidíme, jak s rostoucím kvadrátem vzdálenosti klesá intenzita osvětlení zdroje podle čtvercového fotometrického zákona. Když spojíme body o stejných hodnotách osvětlenosti dostaneme křivky svítivosti, které se nazývají izoluxy [1].

Osvětlenost bodového zdroje světla  $Z$ , který je ve vzdálenosti  $l$ , jehož světlo dopadne na plochu  $dA$ , která tvoří okolí bodu  $P$  na rovině  $\rho$ , můžeme vypočítat pomocí vztahu 1.9, ale je třeba znát jaký úhel  $\beta$  podle normály  $N_\rho$  svírá rovina  $\rho$  s paprskem  $l$  (viz obr.6) [1].

$$E_{p\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos\beta \quad (lx; cd, m, -) \quad (1.9)$$

$I_\gamma$  představuje svítivost bodového zdroje ve směru paprsku  $l$  pod úhlem  $\gamma$  od zvoleného směru  $I_o$  [1].



Obr. 6 Definice bodového zdroje světla [2]

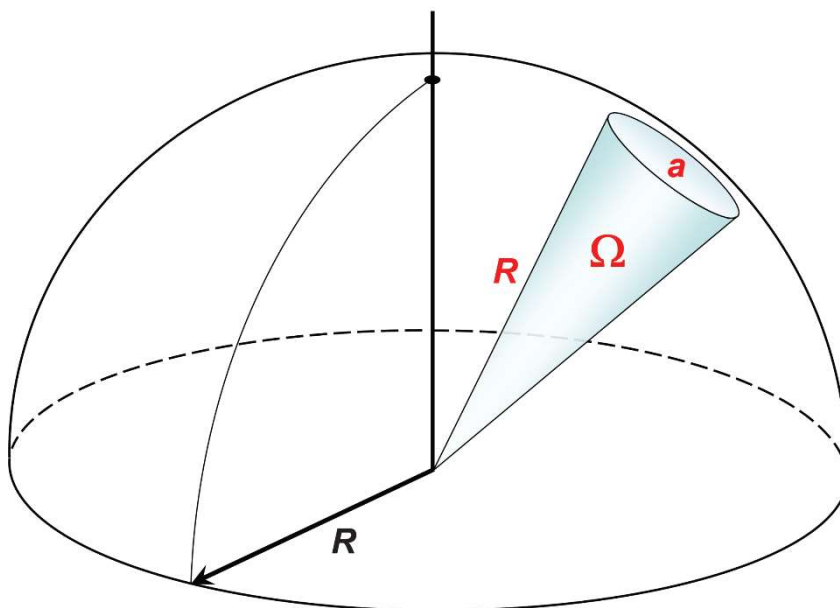
Ve směru normály je tedy největší osvětlenost, a kdybychom měli zdroj světla ve směru normály, je možné ve vztahu 1.9 dosadit za  $\cos\beta = 1$ , a tím ho zanedbat. Osvětlenost je proto přímo úměrná hodnotě  $\cos\beta$ , a je funkcí jak bodu, tak i orientovaného směru [1]. Z rovnice lze také vidět, že intenzita klesá s rostoucí vzdáleností  $l$  od daného bodu  $P$  [2].

### 1.3 Prostorový úhel

Prostorový úhel je geometrická veličina, která vyjadřuje velikost plochy vyřaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, přičemž na obr. 7 máme vyřatou polokouli jen pro názornost, abychom si mohli představit jeho výpočet. Prostorový úhel se značí  $\Omega$ , a má jednotku steradián ( $sr$ ), který je určený jednotkovou plochou  $1 m^2$  na povrchu jednotkové koule s poloměrem 1 metr. Prostorový úhel se vypočítá pomocí vztahu [1]:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (sr; m^2, m) \quad (1.10)$$

V obr. 7 můžeme vidět, že „ $A=a$ “ je plocha vyřatá na povrchu dané koule a „ $r=R$ “ je poloměr dané koule.



Obr. 7 Prostorový úhel [4]

Prostorový úhel tedy může nabývat nejvíce plochu jedné koule, tedy  $\Omega_{max} = 4\pi (sr)$ , jelikož je to maximální velikost plochy koule [2].

Pro kužel, který je na obr. 7 odvodíme vztah mezi velikostí prostorového úhlu  $\Omega$ , a rovinného úhlu  $\varphi$ , který svírají přímky daného kužele vzniklé jako průsečík kuželové plochy daného kužele, a její roviny, která prochází osou daného kužele [5].

Platí:

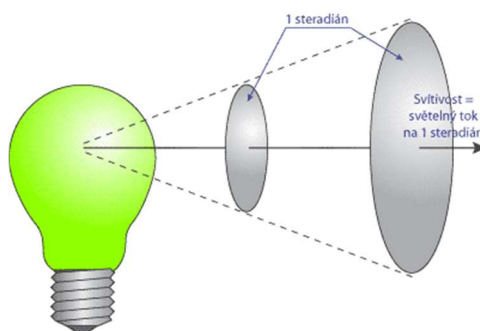
$$\Omega = 2 \cdot \pi \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right) \quad (sr; rad) \quad (1.11)$$

Setkáme se i s pojmem ekvivalentní prostorový úhel  $\Omega_e$ . Pokud do něj bodový zdroj vyzáří všechen světelný tok  $\Phi$ , potom by byla svítivost ve všech směrech stejná, a rovna svítivosti  $I_o$ . Ekvivalentní prostorový úhel se vypočte [2]:

$$\Omega_e = \frac{\Phi}{I_o} \quad (sr; lm, cd^{-1}) \quad (1.12)$$

## 1.4 Svítivost

Tato světelně technická veličina popisuje distribuci světelného záření do prostoru. Její hodnota vyjadřuje, kolik světelného toku, vyzáří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Jednotkou svítivosti je kandela z anglického slova candle. Český překlad tohoto slova je svíčka, její zkratka je (cd), a patří do základní soustavy SI. Kandela je definována jako svítivost zdroje, který vyzařuje pod určitým úhlem monochromatické záření s intenzitou  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  a frekvencí  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ . Tyto hodnoty jsme zmiňovali již v kapitole 1.1.3, kde to bylo počítáno pro danou vlnovou délku a pro danou frekvenci. Střední hodnota svítivosti se určuje ze světelného toku  $\phi$ , který vyzařuje v jednotkovém prostorovém úhlu  $\Omega$ , jehož jsme zmiňovali v předchozí kapitole [2].



Obr. 8 Svítivost [7]

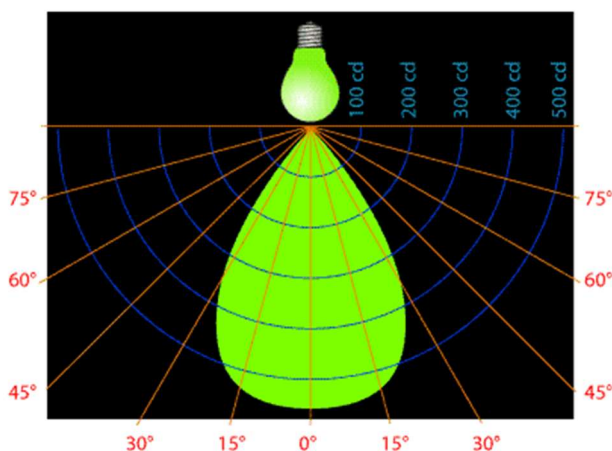
Na obr. 8 vidíme, že svítivost získáme pomocí světelného toku, který je vyzářený pod určitým prostorovým úhlem, na určitou plochu, a platí  $\text{Lumen} = \text{Kandela} \cdot \text{steradián}$ . Svítivost v kandelách tedy vyjadřuje hustotu světelných paprsků do určitého směru. Z obrázku tedy lze vyvodit i základní vztah pro určení svítivosti [7]:

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (\text{cd}; \text{lm}, \text{sr}^{-1}) \quad (1.13)$$

Svítivost je definována pouze pro bodový zdroj, jehož rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností kontrolního bodu od vrcholu prostorového úhlu  $\Omega$  [1]. V praxi by měl být tento poměr větší než 5, aby byl světelný zdroj brán jako bodový [2]. Pokud se změří svítivost ve všech bodech prostoru v okolí zdroje a následně i hodnoty vektorů, lze dostat prostorové rozložení svítivosti zdroje. Ovšem s prostorovým rozložením se obvykle nepracuje, a používají se různé typy řezu touto plochou. Těmto řezům se říká křivky svítivosti, a vynášejí se v polárních souřadnicích, které charakterizují distribuci světelného toku. Vztažný směr je obvykle shodný s normálou hlavní plochy svítivosti, od níž se pak počítají všechny úhly. Křivky svítivosti se dají vypočítat pomocí vztahu [1]:

$$I_\gamma = I_o \cdot f_I(\gamma) \quad (\text{cd}; \text{cd}, -) \quad (1.14)$$

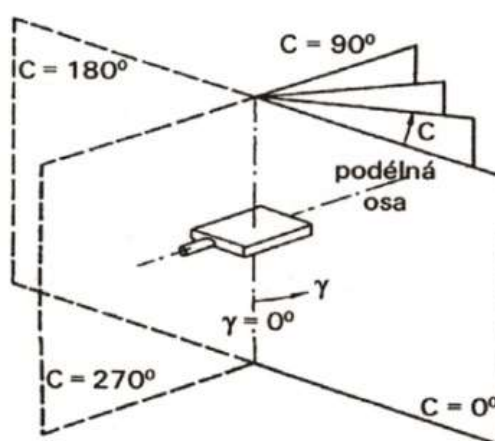
Na obr. 9 vidíme zdroj světla, a jeho svítivost v daném směru. Dá se z něj vyčíst, že daný zdroj světla vyzařuje ve směru  $0^\circ$  přibližně 560 cd, ve směru  $15^\circ$  vyzařuje 520 cd, a ve směru  $30^\circ$  vyzařuje 350 cd. V dalších směrech již bude vyzařování velmi malé, nebo žádné [7].



Obr. 9 Diagram svítivosti [7]

Křivky svítivosti se pak udávají v určitých polorovinách. Tyto poloroviny prochází optickým středem zdroje světla. Používá se více systémů řezů. Jedním z nich je C- $\gamma$  viz (obr. 10), se kterým s při měření pracuje. Jedná se o řez, jehož osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla. Dále se používají systémy polorovin A- $\alpha$ , kde je osa svítidla shodná s podélnou osou svítidla a B- $\beta$  s příčnou osou svítidla. Příklad řezu pro systém C- $\gamma$  je znázorněn níže na obr. 10 [2].

Prostorové rozložení svítivosti se dá znázornit na povrchu jednotkové koule, na níž jsou vyneseny body s danou velikostí a směrem. Poloha jednotlivých bodů se popisuje pomocí rovnoběžek a poledníků. Následně se hodnoty se stejnou svítivostí spojí křivkou, tzv. izokandelou [2]. Pokud se nakreslí sítě izokandel, vznikne izokandelový graf, na kterém lze mimo jiné pozorovat rovnoměrnost svícení světelného zdroje [1].



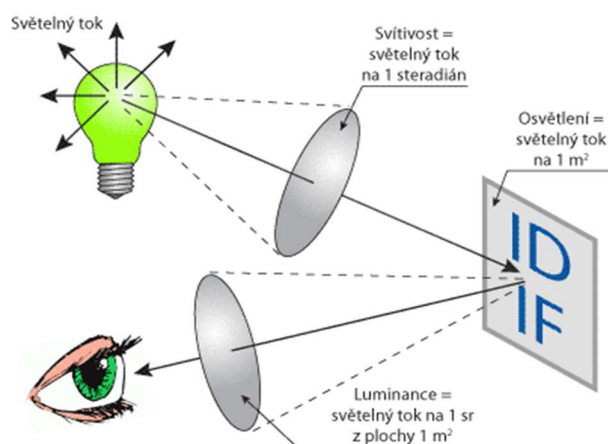
Obr. 10 Systém řezu polorovin C- $\gamma$  [1]

## 1.5 Jas

Jedná se o fotometrickou veličinu, která se definuje také jako měrná svítivost, a nazývá se také jako luminance. Její označení je  $L$ , a udává se v jednotkách ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Lidské oko na jas reaguje, a přizpůsobuje se jeho kontrastu [2]. Tato veličina je popsána prostorovou a plošnou hustotou světelného toku přenášeného paprsky. Vždy záleží na poloze pozorovatele a na směru jeho pohledu, a nezáleží přitom zda je jas odražen [1]. Jas je určen vztahem:

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{sr}, \text{m}^2) \quad (1.15)$$

V tomto vztahu  $L$  představuje jas ve směru osy svazku světelných paprsků, kdy  $d\Omega$  je prostorový úhel, kterým se šíří paprsky, a  $dA_n$  je plocha na kterou paprsky dopadají, přičemž je kolmá k ose svazku světelného toku  $\phi$  [2].

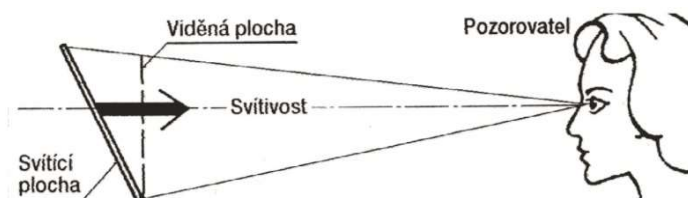


Obr. 11 Jas odražený od plochy [7]

Na obr. 11 můžeme názorně pozorovat souvislost jasu s dalšími světelně technickými veličinami. Velmi zde záleží na úhlu dopadajícího světelného toku, i na úhlu odraženého toku.

Při zjištění hodnot jasu dopadajících z různých směrů do okolí daného bodu prostoru, a směru od uvažovaného počátečního bodu jako radiusvektory, lze zjistit fotometrickou plochu s rozložením jasu. Zde můžeme provést řezy procházející vztažným bodem, podobně jako tomu bylo u svítivosti, a dostaneme také obdobný vztah [1]:

$$L_\gamma = L_o \cdot f(\lambda) \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.16)$$



Obr. 12 Definice jasu [2]

Na obr. 12 můžeme názorně pozorovat závislost jasu na naklopení plochy z úhlu směru pozorovatele [2].



## 1.6 Další parametry a vlastnosti světelných zdrojů

Umělé světelné zdroje jsou základním prvkem osvětlování vnitřních prostor. Na správné volbě světelného zdroje závisí kvalita a úspora celé osvětlovací soustavy. K základním parametrům, které popisují světelné zdroje patří světelný tok, teplota chromatičnosti, měrný výkon, index podání barev a další [2].

### 1.6.1 Teplota chromatičnosti a neutrální teplota (4000 K)

Barvy se dělí na teplé a studené, a tyto dva pojmy můžeme shrnout pod jeden, a tím je teplota chromatičnosti neboli barevná teplota. Tato teplota je dána absolutně černým tělesem, které když se zahřeje na určitou teplotu, tak vydává záření v určité barvě dle obr. 13. Teplota chromatičnosti se udává v kelvinech (K) a značí se  $T_c$ . Teplé a studené barvy mají vliv na psychiku člověka [2].



Obr. 13 Teplota chromatičnosti [10]

Náhradní teplota chromatičnosti se označuje  $T_c$  a má jednotku Kelvin (K). Používá se k popisu barevných vlastností světla. Narozdíl od teplotních světelných zdrojů jako jsou žárovky, kde teplota chromatičnosti odpovídá teplotě vlákna, se u výbojkových světelných zdrojů užívá pojem náhradní teplota chromatičnosti. Náhradní teplota chromatičnosti odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením, jako má výbojový světelný zdroj. V následující tabulce vidíme přehled teplot chromatičnosti pro různé typy světelných zdrojů [2].

Tab. 1 Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti různých zdrojů světla [2]

Druh Světelného zdroje	$T_c$ (K)
Jasná obloha	6 500
Slunce v létě v poledne	5 500
Zářivka nebo LED studená	6 500
Zářivka nebo LED neutrální	4 000
Zářivka nebo LED teplá	3 000
Slunce při západu	3 500 - 4 000
Žárovka, žárovka teple bílá	2 700
Plamen svíčky	1 800

U světelných zdrojů se rozlišují 3 základní kategorie barvy světla, v závislosti na teplotě chromatičnosti. První kategorie je teple bílá, která má méně než 3 300 K, druhou je bílá od 3 300 do 5 000 K, a třetí kategorií je denní, která má více než 5 000 K [2].

Přestože světelné zdroje mohou mít totožnou barvu světla, mohou mít odlišný index podání barev  $R_a$ , které je závislé na spektrálním složení světla daných zdrojů [2].



### 1.6.2 Měrný výkon

Značí se  $\eta_z$ , někdy také  $M_z$  a jeho jednotkou je  $\text{lumen.watt}^{-1}$  ( $\text{lm.W}^{-1}$ ). Vyjadřuje míru přeměny 1 W elektrické energie na světelný tok daného světelného zdroje. Z toho vychází, že se jedná o poměr vyprodukovaného světelného toku „ $\Phi$ “ a elektrického příkonu „ $P$ “ světelného zdroje, přičemž maximum pro fotopické vidění je  $683 \text{ lm.W}^{-1}$ . Zatím nejúčinnější použitelné světelné zdroje dosahují v praxi měrných výkonů kolem  $200 \text{ lm.W}^{-1}$ . Vztah pro měrný výkon [2]:

$$\eta_z = \frac{\Phi}{P} \quad (\text{lm.W}^{-1}; \text{lm, W}) \quad (1.17)$$

Tab. 2 Přehled měrných výkonů komerčně dostupných světelných zdrojů (2019) [2]

Druh světelného zdroje	Příkon (W)	Měrný výkon (lm/W)
žárovka	15 - 200	6 - 15
Halogenová žárovka	10 - 2 000	14 - 26
Kompaktní zářivka	5 - 60	56 - 88
Lineární zářivka T8	10 - 58	65 - 90
Lineární zářivka T5	14 - 80	70 - 104
Indukční výbojky	50 - 400	70 - 93
Rtuťová výbojka	50 - 1 000	50 - 80
Vysokotlaká sodíková výbojka	50 - 1 000	94 - 103
Halogenidová výbojka	35 - 3 500	94 - 103
Nízkotlaká sodíková výbojka	18 - 180	130 - 200
Světelné diody	1 - 20	až 200 *
Xenonová výbojka	25 - 10 000	až 95
Plazmový světelný zdroj	až 250	až 85

\* V laboratorních podmínkách dosahují až  $300 \text{ lm/W}$

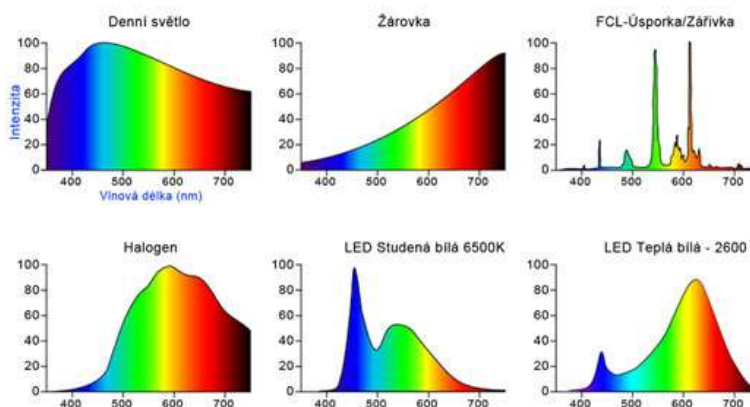
### 1.6.3 Index podání barev $R_a$

Index podání barev vyjadřuje, do jaké míry je člověk schopný při určitém spektru záření určitého světelného zdroje vnímat věrně barvy (označuje se také CRI-color rendering index). Čím je hodnota indexu  $R_a$  větší, tím je věrnější podání barev. Největší hodnoty z umělých zdrojů dosahuje obyčejná žárovka, naopak nejnižší hodnoty dosahuje zdroj monochromatického záření, kterým je nízkotlaká sodíková výbojka. Index  $R_a$  tedy nabývá hodnot od 0 do 100 [2].



Obr. 14 Index podání barev [11, upraveno]

Na obr. 14 můžeme vidět rozdíl v podání barev o hodnotách  $R_a = 60$ ,  $R_a = 80$  a  $R_a = 90$  [11].



Obr. 15 Barevné spektrum světla [11]

Na obr. 15 můžeme vidět, že velmi dobrý index podání barev má Slunce, které má teplotu chromatičnosti 2 700 K, má spojité spektrum, a proto dokáže vykreslit studené i teplé barvy. Nejblíže ke slunečnímu svitu, a s velkým indexem podání barev má žárovka s teplotou chromatičnosti přibližně také 2700 K. Má také spojité spektrum s indexem podání barev  $R_a = 100$ , přičemž vykresluje barvy velmi reálně.

### 1.6.4 Životnost světelných zdrojů

Informace o životnosti světelných zdrojů udává, jak dlouho daný světelný zdroj vydrží hospodárně svítit. U žárovek se udává životnost přepálením vlákna, kdežto u jiných zdrojů jako jsou výbojky nebo ledky je tomu jinak, jelikož zde se vlákno nepřepálí, ale dochází k poklesu světelného toku. Po určitém čase daný zdroj svítí neekonomicky a vyžaduje výměnu. Rozlišují se dva druhy životností [2]:

- 1) Průměrná životnost – doba životnosti je dána časem, kdy bude svítit přesně polovina ze sledovaného počtu světelných zdrojů. Průměrnou životnost vyjadřuje křivka mortality (úmrtnosti).
- 2) Užitečná životnost – doba životnosti je dána časem, kdy světelný tok zdroje klesne na 80 % počáteční hodnoty světelného toku. Pro LEDky platí 70 %. Tato hodnota se v praxi značí L70, pro danou procentuální životnost světelného toku.

*Tab. 3 Orientační životnost světelných zdrojů (2019) [2]*

Druh světelného zdroje	Průměrná životnost (h)	Užitečná životnost (h)
obyčejné žárovky	1 000	1 000
Halogenové žárovky	2 000 - 3 000	2 000 - 3 000
Kompaktní zářivky	15 000	6 000 - 15 000
Lineární zářivky	20 000	10 000 - 18 000
Vysokotlaké rtuťové výbojky	16 - 24 000	10 000 - 20 000
Vysokotlaké sodíkové výbojky	32 000	20 000
Nízkotlaké sodíkové výbojky	16 000	16 000
Halogenidové výbojky	10 000	4 000
Indukční výbojky	60 000	20 000
Výkonové LED	50 000 - 100 000	25 000 - 50 000
Plazmové světelné zdroje	50 000	50 000
Xenonové výbojky	1 000 - 3 000	1 000 - 3 000

Život světelných zdrojů lze vidět v tab. 3, a udává se v hodinách. V průběhu činnosti světelných zdrojů probíhají různé fyzikální a chemické reakce, které způsobují postupné změny jeho parametrů, a určují tak jeho aktuální funkce. U žárovek je počáteční světelný tok deklarován po 1 hodině svícení, zatímco u výbojek je to až po 100 hodinách svícení v referenčních podmínkách [1].

## 2 FOTOMETRICKÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

Slouží k měření světelně technických veličin. Můžeme také pomocí těchto přístrojů zjistit nebo ověřit parametry různých zařízení, například světelných zdrojů, svítidel nebo osvětlovacích soustav. Můžeme ověřit kvalitu těchto zařízení, a to nových nebo používaných [12].

### 2.1 Úvod k fotometrickému měření

Fotometrické měření můžeme rozdělit podle požadavků na přesnost měření (viz tab. 4).

*Tab. 4 Rozdělení přesnosti parametrů světelně technických veličin [1].*

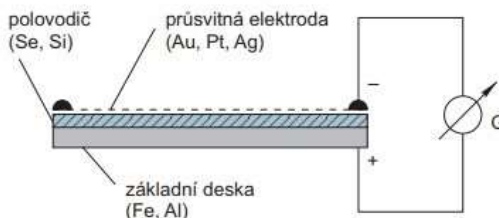
Typ měření	Odhad rozšířené nejistoty $U$ (%)	Příklady
Přesné	$U \leq 8$	Kalibrace přístrojů, tvorba etalonů, laboratorní měření
Provozní	$8 < U \leq 14$	Ověřování parametrů zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav
Orientační	$14 < U \leq 20$	Kontrola funkce osvětlovacího zařízení

Metody měření lze rozdělit na vizuální (subjektivní), kdy se při jejich měření se využívá zrak, a na fyzikální (objektivní), kdy se měří pomocí fyzikálních čidel. Využívají se obvykle poměrně přesné přístroje, které jsou vybaveny fotoelektrickými články.

### 2.2 Fotoelektrický článek

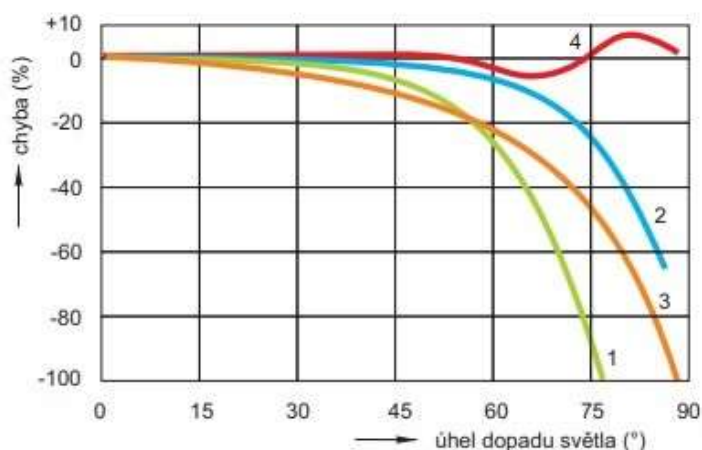
Při objektivním měření se lidský zrak nahrazuje fyzikálními čidly, a mohou to být teoreticky i emisní fotonky, fotoelektrické násobiče nebo fotorezistory. Největší využití mají fotočlánky a nejvíce se používají hradlové (křemíkové, selenové). Jsou založeny na principu ventilového fotoefektu.

Fotočlánek se skládá ze železné desky (případně hliníkové), na které je vrstva polovodiče (křemík, selen), a je pokryta průsvitnou vodivou vrstvičkou platiny, stříbra nebo zlata. Toto složení můžeme vidět také na obr. 16. Po obvodu fotonky je sběrný kroužek, který odvádí elektrický proud. Když dopadne světlo mezi kovovou podložku a vrstvu polovodiče, vznikne mezi nimi rozdíl potenciálů, a uzavřeným obvodem začne protékat proud.



Obr. 16 složení fotočlánku [1]

Fotočlánky by se měly co nejvíce shodovat s křivkou spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele  $V(\lambda)$ . Při měření je rozhodující druh měřeného světla, jestli je shodné se světlem, které bylo použito při cejchování přístroje. Pokud je měřené světlo jiného druhu, musíme použít korekční činitel, nebo vybavit fotočlánek korekčním filtrem. Při delším měření je třeba kontrolovat selenové fotočlánky, protože mohou ztrácet přesnost, nebo můžeme využít křemíkových fotočlánků. Proud u některých fotočlánků může také záviset na kolísání světelného toku zdroje světla, který je napájen střídavým proudem. Může se využít elektronický předřadník, který zajistí napájení světelného zdroje proudem o vysoké frekvenci (30 kHz a vyšší), a zde se tento vliv již neprojevuje. Fotočlánky se kalibrují pro kolmý dopad světla. Při šikmém dopadu světla, při stejné svítivosti zdroje a stejné vzdálenosti je osvětlenost rovna kosinu úhlu dopadu. Při úhlech větších než  $30^\circ$  jsou zde značné odchylky (viz obr. 17)

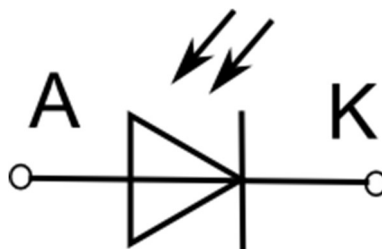


Obr. 17 odchylky měření fotočlánku v závislosti na úhlu [12]

Odchylka je způsobena částečným zrcadlovým odrazem, sníženou propustností horní vrstvy, polarizací i cloněním okraje fotočlánku jeho obrubou. Směrová chyba se odstraňuje kosinusovým nástavcem [13].

## 2.3 Fotodioda

Příkladem často používaného fotočlánku může být třeba fotodiody. Jedná se o polovodičovou diodu, která je citlivá na osvětlení jejího PN přechodu světlem určité vlnové délky.



Obr. 18 Schématická značka fotodiody [14]

Jestliže diodu osvítime světlem vhodné vlnové délky, tak aby energie fotonů byla větší než šířka zakázaného pásu použitého polovodiče, začnou poté přecházet elektrony do vodivostního pásu, vznikají díry, a začne protékat proud diodou [13].

## 2.4 Luxmetr

Využívá se pro měření osvětlenosti. Obvykle si pod pojmem luxmetr představíme přístroj na měření rovinné osvětlenosti, ale mohou být i luxmetry na měření osvětlenosti kulové, válcové, polokulové a poloválcové. Snímací úhel pro měření luxmetrem je  $90^\circ$ , pakliže by úhel nebyl kolmý k rovině měřené plochy, nebylo by měření přesné. Fotometrická hlava je většinou vybavena filtrem pro přizpůsobení spektrální citlivosti, a difúzním nastavcem pro korekci směrové chyby fotodetektoru (kosinový nástavec). Na obr. 19 vidíme rovinný luxmetr s fotočlánkem [2].



Obr. 19 Rovinný luxmetr s fotočlánkem [2]

Obvykle se luxmetry rozlišují do tříd přesnosti číslicemi 1, 2, 3, 4, nebo písmeny L, A, B, C. Těmito třídám přesnosti odpovídají dovolené chyby luxmetrů 2, 5, 10, 20 %. Sleduje se celkem až 11 druhů možných chyb, mezi které patří například chyba spektrální, která vzniká při měření osvětlenosti světlem jiného spektrálního složení, než které bylo použito při kalibraci daného luxmetru. Dále pak chyba směrová, úhlová, linearity a citlivosti na UV a IČ záření. Luxmetry s třídou přesnosti L a A se využívají jako sekundární etalony pro přesná laboratorní měření. Pro běžnější měření se používají přístroje s třídou přesnosti B a C. Luxmetr musí zvládnout přetížení svého měřicího rozsahu až o 20 %, a to až po dobu 5 minut. Životnost luxmetru se pohybuje kolem 5 000 hodin. Před měřením je třeba fotočlánky nechat odkryté na světle, aby se čidla přizpůsobila a stabilizovala se. Při měření musíme počkat, dokud se hodnota nestabilizuje.

Je nutná pravidelná kalibrace těchto přístrojů, a to nejdéle po dvou letech, pokud je chceme používat pro přesná měření. Pro provozní měření je nutná kalibrace nejdéle po třech letech. Pro orientační měření stačí kalibrovat přístroje jednou za pět let. Provozní luxmetr, který je znázorněn na obr. 19 bývá vybaven dostatečně dlouhým stíněným kabelem, který spojuje fotočlánek s měřicím přístrojem, a tím se zajistí, že výsledky měření při čtení údajů nebudou nevhodně ovlivněny, například obsluhou měření. Kdyby byl totiž fotočlánek zabudovaný v měřicím přístroji, mohlo by právě docházet k ovlivnění měření obsluhou, například zastíněním čidla, nebo odrazem světla od oděvu. Takové luxmetry se používají pro orientační měření [12].

## 2.5 Jasoměr

Princip jasoměru je podobný jako u luxmetru. Je doplněn optikou, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo fotočlánku v definovaném prostorovém úhlu, ve kterém se integruje snímaný jas. Jasoměr měří jas reálných nebo fiktivních povrchů, které vyzařují nebo odrážejí světlo. Na obr. 20 vidíme příklad jasoměru [2].



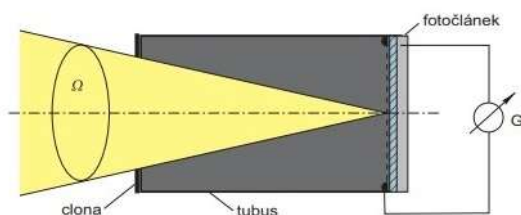
Obr. 20 Jasoměr – LS100 [2]

Digitální fotoaparát se softwarově nebo opticky upravenou spektrální citlivostí podle křivky citlivosti lidského oka  $V(\lambda)$  je v podstatě jasový analyzátor, který dokáže na rozdíl od jasoměru snímat jasové mapy s rozlišovací schopností, která je daná prostorovým úhlem snímaným jedním pixelem. Využívá se překrývání několika identických snímků s různou expozicí k navýšení dynamického rozsahu.

Na obr. 21 vidíme, jak funguje objektivní jasoměr, kde je na přijímači (galvanometru) nasazený tubus. Tubus je trubka, která je uvnitř černá a v předu má clonu s kruhovým otvorem, kterým je vymezen prostorový úhel  $\Omega$ , kde dopadají paprsky na změřený fotočlánek (přijímač). V tomto provedení se fotočlánek změří normálová osvětlenost  $E_N$  přijímací plochy čidla. Následně se vypočítá střední jas:

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (cd \cdot m^{-2}; lx, sr) \quad (2.18)$$

Ze vztahu 2.18 vyplývá, že jasoměr udává střední hodnotu jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu. Měřená plocha by měla obsahovat pouze měřený povrch [2].



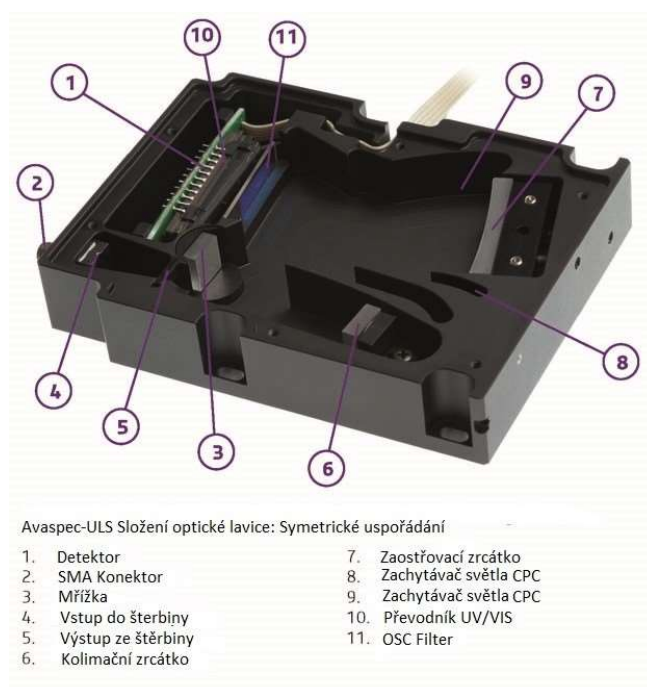
Obr. 21 Princip objektivního jasoměru [12]

## 2.6 Spektroradiometr

Pomocí tohoto přístroje se měří spektrum optického záření. Tento přístroj může měřit spektrální složení dopadajícího záření, jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $v$ , náhradní teplotu chromatičnosti, dominantní vlnovou délku, index podání barev, kolorimetrickou čistotu [2]. Používá se v aplikacích, jako jsou měření barev, stanovování koncentrace chemických složek nebo analýza elektromagnetického záření. Díky vývoji mikroelektroniky v oblasti vícečlánkových optických detektorů, jako jsou ccd a fotodiody se umožnila výroba levných snímačů, kamer, fotoaparátů. Používají se také ve spektroradiometrech, což umožňuje rychlé skenování spektra bez nutnosti pohybující se mřížky [22].

### 2.6.1 Konstrukce

Spektroradiometr se obvykle skládá ze vstupní štěrbinu, kolimátoru, disperzního prvku (mřížka nebo hranol), zaostřovací optiky a detektoru. Monochromatický systém obsahuje výstupní štěrbinu, ale pouze jedna úzká část spektra je promítána na jednopohledový detektor. U monochromatických přístrojů jsou vstupní a výstupní štěrbinu v pevné poloze, a lze je měnit v šířce. Otáčením mřížek se skenuje spektrum [22].



Obr. 22 Složení spektroradiometru [22, upraveno]

### 2.6.2 Funkce spektroradiometru

Srdcem většiny spektroradiometrů s optickými vlákny je optická lavice s ohniskovou vzdáleností 37,5; 45; 50 nebo 75 mm. Světlo vstoupí na optickou lavici prostřednictvím standardního konektoru SMA-905, a je kolimováno sférickým zrcadlem. Jednoduchá mřížka odráží kolimované světlo. Druhé sférické zrcadlo zaostří výsledné difrakční světlo. Obraz spektra je promítnut do jednorozměrného lineárního detektorového pole [22].



### 2.6.3 Jak vybrat správnou mřížku

Difrakční mřížka je optický prvek, který odděluje dopadající polychromatické záření do svých základních vlnových délek. Mřížka se skládá ze série rovnoměrně rozložených rovnoběžných vrypů vytvořených v odrazném povlaku, a uloženém na vhodném substrátu.

*Tab. 5 parametry vrypů na difrakční mřížce 2019 Avantes [22]*

Použití	Použitelný rozsah (nm)	Spektrální rozsah (nm)	Hustota vrypů (g/mm)
UV/VIS/NIR	200-1100	900	300
UV/VIS	200-850	520	600
UV	200-750	250-220	1200
UV	200-650	165-145	1800
UV	200-580	115-70	2400
UV	220-400	70-45	3600
UV/VIS	250-850	520	600

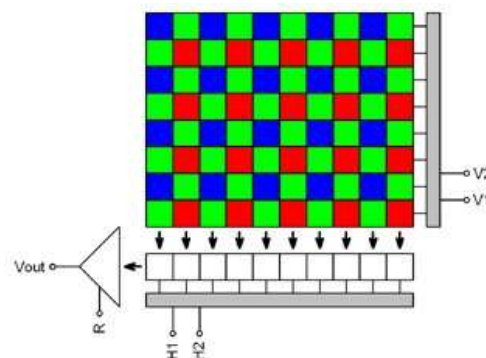
Způsob, jakým jsou vytvořeny vrypy se odděluje do dvou typů: řízené a holografické. Řízené mřížky jsou vytvořeny na reflexním povrchu s diamanty, a holografické mřížky jsou vytvořeny z laserových interferenčních vztahů a fotolitografického procesu. Mřížka bývá trvale instalovaná, a je dána pro konkrétní rozsah vlnových délek. Pokud chceme pokrýt větší rozsah musíme volit dvojité nebo vícekanálový spektrometr. Potom může mít každý kanál různé mřížky pokrývající odlišný rozsah zájmu. Kromě širšího rozsahu nabízí také dvoukanálový nebo vícekanálový spektrometr vyšší rozlišení pro každý kanál. Spektrální rozsah pro výběr z tab. 5 závisí na počáteční vlnové délce mřížky a počtu vrypů. Čím větší je vlnová délka, tím větší je disperze a tím menší je rozsah, který chceme vybrat [22].

### 2.6.4 CCD-princip

Jedná se o systém, který je citlivý na elektrický náboj, a přemění energii dopadajícího světla na energii elektrického signálu. Skládá se ze světločivého křemíkového plátku uloženého nad kovovou elektrodou, která je izolována vrstvou křemene. Opakují se zde dva základní kroky. V prvním kroku dopadnou fotony na atomy křemíku uvnitř CCD, odkud se díky fotoefektu uvolní záporně nabitě elektrony. Kladně nabitá elektroda je umístěna pod každým pixelem, a je oddělená od křemíku vrstvou křemene, který slouží jako izolační vrstva a zachycuje uvolněné elektrony. Když dopadne na CCD více světla, vznikne obraz, kde jasné oblasti odpovídají pixelům, kde se uvolnilo více elektronů [16].

Druhým krokem je čtení tohoto obrazu pixel po pixelu. To znamená, že se kladný náboj vlnivě přesouvá podél elektrod, a v každém sloupci pixelů stahuje elektrony z jednoho pixelu na druhý, a elektrony v nejnižším čidle sloupce se přenesou do CCD uspořádaných v řadě za sebou. Každá řada má svou sadu elektrod, které tlačí skupinu elektronů jednu po druhé, až k terminálu na konci zařízení [16].

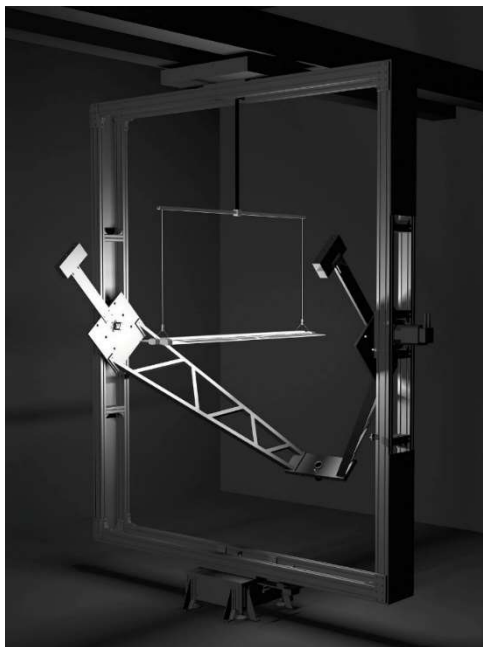
CCD čipy využívají tzv. Bayerovy masky, která kryje jednotlivé pixely různými filtry ve tvaru šachovnice (viz obr. 23). Používá se například u digitálních fotoaparátů, videokamer [17].



Obr. 23 CCD princip [17]

## 2.7 Goniofotometr

Goniofotometry se používají pro měření křivek svítivosti a celkového světelného toku. Měření celkového světelného toku s goniofotometrem je časově mnohem náročnějším měřením než v kulovém integrátoru, ale je výrazně přesnější. Tato metoda poskytuje naměřené hodnoty svítivosti ve všech úhlech kolem světelného zdroje. Goniofotometr je absolutně nezbytný pro parametry, jako jsou částečný světelný tok nebo úhel vyzařování, které potřebujeme znát pro parametry svítidla, například pro určení účinnosti daného svítidla. Goniofotometr může být použit s fotometrem nebo se spektrometrem. V závislosti na měřeném objektu může být použita hlava fotometru jako detektor, což umožní provádět velmi rychlé měření pro světelný tok a měření křivek svítivosti. Fotometr musí mít dobré přizpůsobení funkce citlivosti lidského oka  $V(\lambda)$ . Obecně se v nesouladu s  $V(\lambda)$  použije index  $f_1'$ . Podle normy musí být hodnota  $f_1'$  menší nebo rovna 3 %, aby bylo dosaženo přesného měření. Když se místo fotometru použije spektrometr, dostaneme systém známý jako goniospektrometr. Měření může trvat až několik hodin pomocí spektrometru. Goniospektrometr umožňuje prostorové rozložení všech fotometrických a kolorimetrických parametrů, společně s křivkami svítivosti, barevnými souřadnicemi, náhradní teplotou chromatičnosti (CCT) a indexem podání barev (CRI). Vysoký index barevného podání je stále důležitějším kritériem, který má dopad na rozhodování při vývoji a uvádění LED světelných zdrojů na trh. Goniospektrometr je proto všeobecně důležitým nástrojem pro definování všech charakteristik světelného zdroje, proto mohou být světelné zdroje s úzkopásmovými spektrálními složkami měřeny s vysokou přesností. Spektrometr musí pokrývat rozsah vlnových délek alespoň 380 až 780 nm, přesnost vlnové délky musí být menší než 0,5 nm a musí mít maximální šířku pásma 5 nm. Ideální variantou je, když je pokryto celé viditelné spektrum (tzn. 380 až 780 nm) [17].



Obr. 24 Goniofotometr Rigo801 [26]

Na obr. 24 je zobrazen goniofotometr typu C, který měří objekty do průměru 2 000 mm [26]. Obsahuje fotočlánek, jasovou kameru, která dokáže měřit i jas.

Podle konstrukce se dělí na typy A, B a C v závislosti na tom, jak se otáčí s ramenem, a kde je uchyceno svítidlo. Může se skládat z pevného zdroje světla a otočného fotometru nebo pevného zdroje světla i fotometru s otočnou zrcadlovou soustavou [15].

### 2.7.1 Typy A/ B/ C

Počet křivek svítivosti a výběr konkrétních měřících rovin závisí na typu světelného zdroje a goniofotometru. Rozlišujeme 3 typy goniofotometru na základě publikace CIE č.70. Značí se v souladu s měřícími rovinami A, B nebo C. Goniofotometr typu A se používá pro venkovní osvětlení, například u světel automobilů. Typ B se používá pro venkovní osvětlení, jako je osvětlení ulic, a typ C se využívá obecně u osvětlení, které má asymetrické rozložení světla [15].

#### 2.7.1.1 Typ A

Měření probíhá na vodorovné ose, zatímco druhá osa je udržována v pevné poloze (rotace oproti výšce).



Použití: venkovní osvětlení automobilů, přímé světelné zdroje (osvětlení železnic, cedule)

Obr. 25 Goniofotometr Typu A [15]

#### 2.7.1.2 Typ B

Měření se provádí na svislé ose, zatímco druhá osa je udržována v pevné poloze (výška oproti rotaci).



Použití: vhodné pro stejné světelné zdroje jako u typu A, ovšem jsou vhodné i pro svítidla na ulici, svítidla zapuštěná do země.

Obr. 26 Goniofotometr Typu B [15]

#### 2.7.1.3 Typ C

Pevná svislá osa a pohybující se vodorovná osa. Měření se provádí v rovině C a typ C odpovídá typu B pootočenému od 90° [15].



Použití: Obecné osvětlení, které má asymetrické rozložení světla

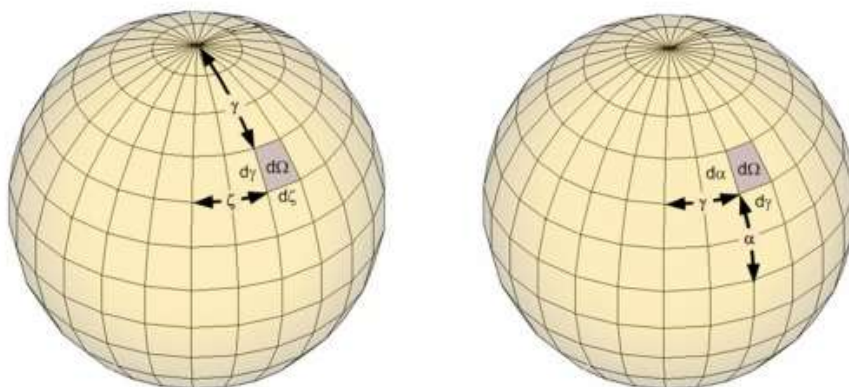
Obr. 27 Goniofotometr Typu C [15]

### 2.7.2 Měření křivek svítivosti

Svítivost lze obecně popsat vztahem

$$I_\gamma = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad (cd; cd, -) \quad (2.19)$$

Nejčastěji se křivky svítivosti měří v rovinách C- $\gamma$ , jejichž osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla. Aby udávané křivky svítivosti byly nezávislé na světelném toku zdroje svítidla, přepočítávají se diagramy na světelný tok 1000 lm [1].



Obr. 28 prostorový úhel v polárních souřadnicích [20]

Pro libovolný element platí, že plocha je dána vztahem:

$$d\Omega = \sin\gamma \cdot d\gamma d\zeta \quad (sr; -) \quad (2.20)$$

Podobně je tomu pro polární systém souřadnic:

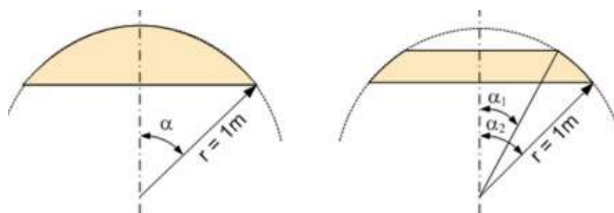
$$d\Omega = \cos\alpha \cdot d\gamma d\alpha \quad (sr; -) \quad (2.21)$$

Můžeme odvodit vztah pro velikost prostorového úhlu kulového vrchlíku:

$$d\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos\alpha) \quad (sr; -) \quad (2.22)$$

A pro kulový pás:

$$d\Omega = 2\pi \cdot (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (sr; -) \quad (2.23)$$



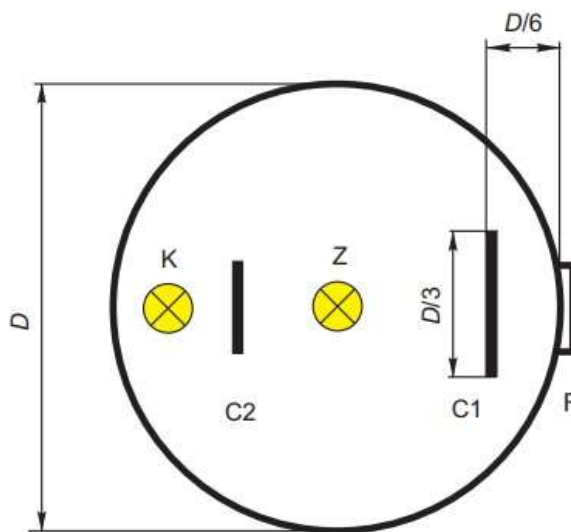
Obr. 29 Prostorový úhel kulového vrchlíku a pásu [20]

Když máme vymezený prostorový úhel a známe světelný tok můžeme vypočítat svítivost.

$$I_\gamma = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (cd; lm, sr) \quad (2.24)$$

## 2.8 Kulový integrátor

Jedná se o dutou kouli, která je na vnitřním povrchu natřená bílým rozptýlným nátěrem s vysokým činitelem odrazu, a nátěr musí být barevně neselektivní. Nejlépe vyhovují zinkové, titanové nebo barytové běloby. Základní nátěr bývá trvalý, a je na něj nanesen další nátěr, který se musí obnovovat, a je rozpustný ve vodě. Činitel odrazu by měl být v mezích 0,75 – 0,95 [1]. Koule má na jedné straně okénko s fotočlánkem (viz obr. 30) zastíněný clonkou C1 (třikrát menší než průměr kulového integrátoru), aby na něj nedopadlo světlo z měřeného zdroje, a na druhé straně je korekční žárovka K zastíněná clonkou C2. Zdroj světla je zavěšen ve středu koule, a samotný kulový integrátor funguje na principu mnohonásobných odrazů, které probíhají uvnitř. Teoreticky je pak výsledná záře svítidla ve všech bodech stejná, a její hodnota se měří fotočlánkem [18].



Obr. 30 Schéma kulového integrátoru [18]

### 2.8.1 Teorie kulového integrátoru

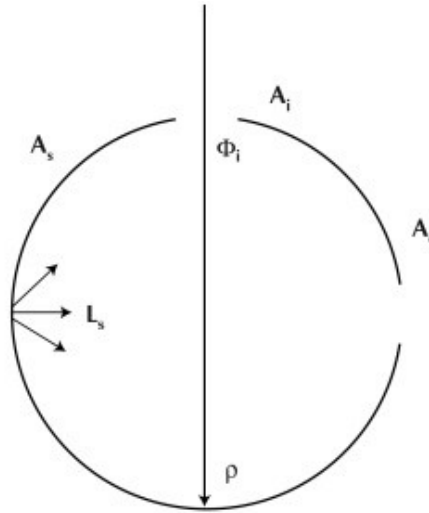
Funkcí kulového integrátoru je prostorově integrovat zářivý tok. Můžeme si to vysvětlit na příkladu, kde bychom do kulového integrátoru vložili nějaký světelný zdroj, který bude v kulovém integrátoru svítit, a jehož světlo se bude odrážet od odrazových (vnitřních) stěn, které by měly mít co největší odraznost. Ve všech bodech povrchu kulového integrátoru by měla být stejná záře. Odvozují se zde dva parametry, které s kulovým integrátorem souvisí. Jsou to multiplikační koeficient kulového integrátoru, který vyjadřuje jeho průměrnou odraznost, a dále časová konstanta kulového integrátoru, která se projevuje rychlou změnou v krátkém pulzu [21].

Světlo dopadne na vnitřní plochu kulového integrátoru, a vytvoří pomocí odrazů virtuální zdroje světla. Vycházející světlo z povrchu  $1\text{ m}^2$  je nejlépe popsáno zář, která odpovídá hustotě toku na jednotku prostorového úhlu a  $\text{m}^2$ . Záře je důležitá technická veličina, protože se používá k předvídání množství světelného toku, který může být zpracován daným optickým systémem z ozářeného povrchu. vztah záře:

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lm}, -, \text{m}^{-2}) \quad (2.25)$$

Kde  $\Phi_i$  je světelný tok,  $\rho$  je odraznost,  $A$  je ozářená plocha, a  $\pi$  je prostorový úhel povrchu

Pro kulový integrátor musíme zvážit i mnohonásobné odrazy povrchu a ztráty přes otevírací drážky v kulovém integrátoru, vstupní otvor  $A_i$ , a výstupní otvor  $A_e$  (viz obr. 31).



Obr. 31 Uvažování ztrát přes otvory v kulovém integrátoru [21]

Vstupní tok je dokonale rozložen počátečním odrazem. Množství toku, který dopadne na celý povrch je roven  $\Phi_i \rho \left( \frac{A_s - A_i - A_e}{A_s} \right)$ , kde hodnota v závorkách označuje tok přijatý plochou kulového integrátoru, který není zachycen drážkami v kulovém integrátoru. Vhodnější je psát  $1-f$ ), kde  $f$  je část ztracená v drážkách, a platí, že:

$$f = (A_i + A_e) / A_s \quad (-; m, m^{-1}) \quad (2.26)$$

Pokud existují více než 2 otvory, pak se  $f$  počítá jako součet všech otvorů. Podobný vztah je pro množství světelného toku, který nastane po druhém odrazu od plochy kulového integrátoru  $L = \Phi_i \rho^2 (1-f)^2$ , třetí odraz produkuje tok rovný  $L = \Phi_i \rho^3 (1-f)^3$ , a z toho vyplývá, že po  $n$  odrazech celkový světelný tok projde přes celý povrch kulového integrátoru, a je roven:  $L = \Phi_i \rho (1-f) * (1 + \rho(1-f) + \dots + \rho^{n-1}(1-f)^{n-1})$  rozšiřuje se do nekonečné řady, ale vzhledem k tomu, že  $\rho(1-f) < 1$  zmenšuje se na jednodušší formu, která je rovna:  $L = \frac{\Phi_i \rho (1-f)}{1 - \rho(1-f)}$ , tato rovnice označuje, že celkový světelný tok, který dopadne na vnitřní plochu kulového integrátoru je vyšší, než vstupní tok. Je to způsobeno mnohonásobnými odrazy uvnitř kulového integrátoru. Z toho vyplývá, že vnitřní povrchová záře v kulovém integrátoru je dána:

$$L_s = \frac{\Phi_i}{\pi A_s} * \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)} \quad (cd.m^{-2}; lm, sr, m^2) \quad (2.27)$$

Tento vztah se používá k předpovědi parametru zvaného záře. Je dána pro daný vstupní světelný tok. Záři ovlivňují další parametry jako jsou: průměr, odraznost, a poměr vstupů. Záře je tím menší, čím větší je průměr kulového integrátoru [21].

### 2.8.1.1 Multiplikační koeficient

Vztah 2.27 je záměrně rozdělen na dvě části. První část vztahu je rovna vztahu 2.25, a druhá část vztahu znázorňuje multiplikační koeficient kulového integrátoru. Jedná se o nárůst záře v důsledku násobení světelného toku odrazy.

$$M = \frac{\rho}{1 - \rho \cdot (1 - f)} \quad (-) \quad (2.28)$$

Pro většinu reálných kulových integrátorů platí, že odraznost  $\rho$  bude mezi 0.94-0.99 a část ztracená v drážkách  $f$  bude mezi 0.02 až 0.05. Pro tyto hodnoty bude hodnota  $M$  v rozmezí od 10 do 30.

Multiplikační koeficient počítaný ve vztahu 2.28 je specifický pro daný případ, pro který platí, že světelný tok dopadá na vnitřní stěnu kulového integrátoru, kde je odraznost stěny stejná ve všech bodech, ale odraznost v drážkách je nulová.

Obecný vztah je:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \rho_w(1 - \sum_{i=1}^n f_i) - \sum_{i=0}^n \rho_i \cdot f_i} \quad (-) \quad (2.29)$$

Zde platí, že  $\rho_0$  je počáteční odraznost pro dopadající světelný tok,  $\rho_w$  je odraznost vnitřní stěny kulového integrátoru,  $\rho_i$  je odraz v drážkách otvoru kulového integrátoru, a  $f_i$  je část ztracená v drážkách otvoru kulového integrátoru.

Jmenovatel můžeme nahradit  $(1 - \rho)$ , kde  $\rho$  je průměrná odraznost celého kulového integrátoru. Následně můžeme vztah pro multiplikační koeficient napsat z hlediska počáteční i průměrné odraznosti takto:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \rho} \quad (-) \quad (2.30)$$

### 2.8.1.2 Časové zpoždění kulového integrátoru

Většina kulových integrátorů se používá v ustáleném stavu. Předchozí analýza jejich použití předpokládá, že hodnota světla uvnitř kulového integrátoru bude konstantní po dostatečně dlouhou dobu, takže všechny přechodné děje zmizí. Pokud se světelný signál mění rychle, například v krátkých impulsech, nebo pokud je modulován na vysoké frekvenci, jsou zavedeny chyby měření v kulovém integrátoru a výstupní signál může být výrazně zkreslený takzvaným „pulzním protahováním“, který je způsobený vícenásobnými odrazy. Je určen tvar výstupního signálu, který spojuje vstupní signál s impulsní odezvou kulového integrátoru. Tato impulsní odezva má podobu:  $e^{-t/\tau}$ , kde  $t$  je čas a  $\tau$  časová konstanta [21].

### 2.8.2 Velikost kulového integrátoru

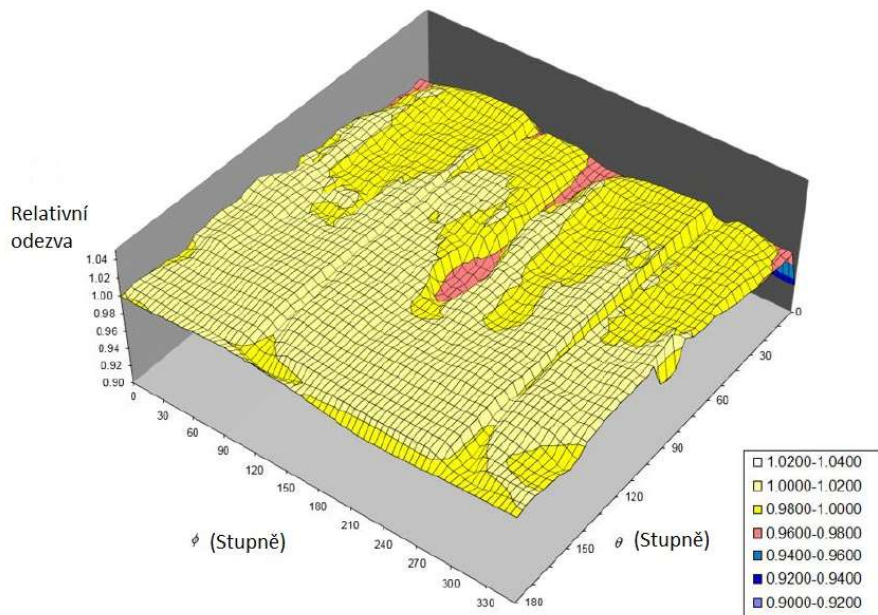
Velikost kulového integrátoru ovlivňuje zejména velikost zdroje, který lze měřit. Následně se volí velikost průměru výstupního/ vstupního otvoru kulového integrátoru, která se volí na základě rozměrů měřeného objektu, clonky a zorném poli okolí. Čím větší je kulový integrátor s ohledem na vstupní otvor, tím větší je uniformita neboli rovnoměrnost vnitřního povrchu kulového integrátoru. Další parametry jsou stejné. Nicméně napájení, požadované v kulovém integrátoru k vytvoření dostatečného záření, se zvětšuje s velikostí kulového integrátoru. Dělají se kompromisy ohledně celkové velikosti kulového integrátoru, které jsou na základě dostupného místa pro kulový integrátor, jeho přepravu, uložení a náklady s tím spojené.



### 2.8.3 Rovnoměrnost vnitřního povrchu (uniformita)

Rovnoměrný vnitřní povrch zajistí rovnoměrnou záři i při měření neuniformních světelných zdrojů. Stejně důležité jako je hodnota rovnoměrnosti vnitřního povrchu je důležitá metoda, jakou se rovnoměrnost měří. Běžné metody zahrnují mapování záření zdroje s použitím zobrazovacího systému nebo mapování ozáření na cíl pomocí jednoduchého detektoru s širokým zorným polem. Rovnoměrnost ozáření při měření vzdálenosti od zdroje závisí na geometrii kulového integrátoru, stejně jako na křivkách svítivosti světelného zdroje [24].

Další metodou, kterou v naší úloze budeme používat je měření vnitřního povrchu kulového integrátoru pomocí poziciometru s kolimátorem. Měří se síť bodů pomocí fotočlánku, nebo spektorradiometru. Naměřené hodnoty se pak vynášejí v poměrných hodnotách (viz obr. 32)



Obr. 32 Mapování odezvy kulového integrátoru [24]

Pro výpočet poměrného prostorového korekčního koeficientu je normalizováno  $K(\theta, \phi)$  jako odezva kulového integrátoru pro izotropní bodový zdroj.  $K^*(\theta, \phi)$  je určen tento vztah:

$$K^*(\theta, \phi) = \frac{4\pi K(\theta, \phi)}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} K(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (-) \quad (2.31)$$

Pomocí  $K^*(\theta, \phi)$  se potom může vypočítat i prostorový korekční faktor  $S_{f,e}$ , který se používá pro externí zdroj s ohledem na izotropní bodový zdroj [24]. Používáme vztah:

$$S_{f,e} = \frac{1}{K^*(\theta_e, \phi_e)} \quad (-) \quad (2.32)$$

Standardní nejistota z tohoto měření je 0,05 % [24].



## 2.8.4 Zdroje chyb

Nejistoty měření jsou funkcí měřicího procesu. Analýza nejistoty měření, jaká se uplatňuje u jakýchkoli vědeckých experimentů nebo u klasických měření, poskytuje interval, ve kterém se nachází měřená hodnota s určitou přesností. Jsou uvažovány náhodné i systematické chyby měření. Náhodné chyby jsou zahrnuty v nejistotě typu A, a lze je opakovaným měřením omezit. Systematické chyby jsou zahrnuty v nejistotě typu B, a nelze je opakovaným měřením omezit. Snížení systematických chyb závisí na provozovateli systému nebo systémového experimentu. Větší počet měření světelného toku je nejviditelnější systematickou chybou a je udávána nejistota kalibrace pro standardní pracovní svítinu [25]. Další nejistoty mohou být nejistota normálu na kterou je systém kalibrován, nejistota jeho časové stability a napájecího zdroje, které se udávají v kalibračním protokolu.

### 2.8.4.1 Geometrické

Jsou spojené s porovnáním zkušebních a standardních svítidel různých fyzických rozměrů a jejich rozložení světelných toků. Chyby jsou minimalizovány při porovnání světelných zdrojů podobných vlastností.

Vznikají z prostorového rozdělení světelného toku uvnitř kulového integrátoru. Celkový světelný tok z vnitřního svítidla vyzařuje přímo na stěny kulového integrátoru. Toto přímé osvětlení může být nerovnoměrné. V kulovém integrátoru může být fotodetektor citlivý na rozložení osvětlení v jeho zorném poli. Proto poměr viditelného osvětlení nemusí být přímo úměrný celkovému světelnému toku pro dva porovnávané zdroje světla. Detektor, který není citlivý na rozložení osvětlení v jeho zorném poli může lépe zaznamenat osvětlení z celého kulového integrátoru a minimalizuje tento účinek. Okno difuzéru nebo malá pomocná koule v přední části fotodetektoru nejlépe zachytí požadované úhly a prostorovou odezvu.

Kvantifikování geometrických chyb v přijatelném rozsahu přesnosti je velmi náročný úkol. Přítomnost clonky, korekční žárovky a svítidla ovlivňuje výkon sférického fotometru [25].

### 2.8.4.2 Absorpce světla

Svítidlo umístěné v kulovém integrátoru má vliv na účinnost daného kulového integrátoru. Je to způsobeno, tím že má svítidlo svoji vlastní absorpci světla. Při měření svítidla s různými absorpčními vlastnostmi, není dosaženo konstantní efektivnosti kulového integrátoru. Efekt je tedy významný zejména při měření zkušebních svítidel jiného typu než těch, které byly použity ke kalibraci. Korekce pro absorpci svítidla vyžaduje použití korekční žárovky, která by měla mít stejné parametry jako měřený zdroj světla.

### 2.8.4.3 Linearita

Výstupní data zobrazená na fotometru musí být lineární s ohledem na úroveň vstupního světla. Linearita znamená, že výstup je přímo úměrný vstupu. Linearita fotometru lze měřit buď násobkem zdroj nebo vícenásobnou clonou či metodou s obráceným čtvercem.

### 2.8.4.4 Elektrické měření

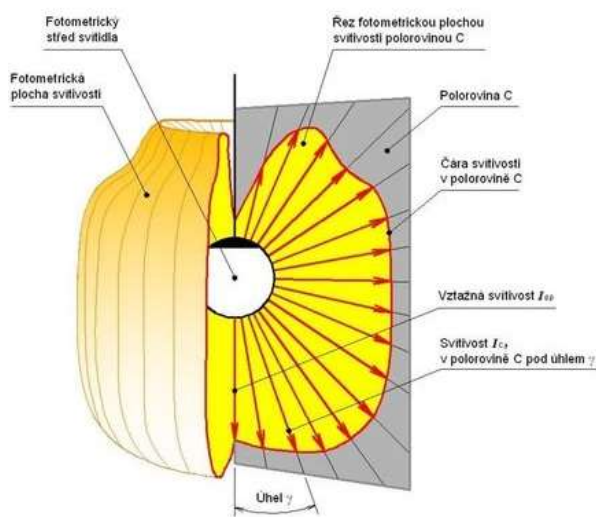
Při kalibraci se světelným normálem, musí být provozní proud nastaven co nejpřesněji. Změna celkového světelného toku pro wolframovou žárovku je přibližně rovna změně provozního proudu umocněného na šestou [25].

### 3 SVÍTIDLA

Pro jejich popis se využívá poměrně rozsáhlý soubor parametrů. Základem jsou světelné technické parametry, které jsme si shrnuli v přechozích kapitolách. Tyto základní světelné technické parametry se používají k základnímu účelu, a to měření osvětlování. Mimo tyto parametry je třeba u použití svítidel zohlednit prostředí, ve kterém se svítidla používají. Musíme zohlednit elektrické a provozně technické vlastnosti. V dnešní době hraje důležitý parametr také energetická náročnost osvětlovací soustavy, tedy použitých svítidel v soustavě. Mnohokrát je důležitý i vzhled svítidla [1].

#### 3.1 Vyzařovací charakteristiky / světelné technické parametry

Základní údaj o svídle udává, jak je světelný tok z instalovaných zdrojů vyzařován do okolního prostoru. Používá se tzv. fotometrická plocha jasů. Jedná se o plochu vzniklou propojením koncových bodů jasů, které jsou vyneseny jako radiusvektory od bodu zdroje do odpovídajících směrů v prostoru. Tento popis umožňuje výpočet světelných technických parametrů v libovolné vzdálenosti od svítidla. V praxi se používají její řezy nejčastěji v rovině C- $\gamma$  [1].



Obr. 33 Vyzařování svítidla v soustavě fotometrických rovin C- $\gamma$  [1]

Pro orientační popis vyzařování svítidel jsou křivky svítivosti uváděny pouze ve vybraných polorovinách. Například u svítidel, které vyzařují rotačně souměrně je tvar křivek svítivosti ve všech polorovinách C stejný. Poté je vyzařování popisováno pouze jednou rovinou C0. U svítidel, které vyzařují souměrně do dvou rovin jsou křivky svítivosti uváděny v rovinách C0-C180 a C90-C270. U lineárních svítidel, kterými jsou například zářivky, je rovina C0-C180 kolmá na osu světelného zdroje. Křivky svítivosti jsou obvykle zobrazovány v polárních souřadnicích, které poskytují názornější představu o vyzařování svítidel. Hodnoty svítivosti se udávají v jednotkách absolutních (cd) nebo poměrných (cd/1 000 lm). Absolutními hodnotami se popisují například reflektorové světelné zdroje nebo zdroje se světelnými diodami, a popis v poměrných hodnotách se používá například u zářivkových svítidel [1].

## 3.2 Energetická náročnost

Další část, která nás bude zajímat je energetická náročnost, kde mají důležitou roli parametry jako jsou příkon, účinnost, měrný výkon. Příkon svítidla je elektrický příkon, který je odebírán z napájecí sítě pro provoz světelných zdrojů, ale také příkon na krytí ztrát v předřadném systému v zapnutém stavu.

### 3.2.1 Účinnost

Účinnost svítidla charakterizuje, jaká část světelného toku zdroje je daným svítidlem vyzařena do okolního prostoru. Účinnost svítidla můžeme dělit na optickou účinnost a provozní účinnost, která se obvykle používá při měření. Jedná se o podíl celkového toku  $\Phi_{sv}$  svítidla poděleného součtem světelných toků z jednotlivých zdrojů  $\Phi_z$ . Pro označení provozní účinnosti svítidel se někdy používá označení LOR (light output ratio)

$$R_{LO} = \eta_{sv} = LOR = \frac{\Phi_{sv}}{\Phi_z} \quad (-; lm, lm) \quad (3.33)$$

### 3.2.2 Měrný výkon

Jedná se o obdobu měrného výkonu jako je u světelných zdrojů. Měrný výkon svítidla je definován jako poměr světelného toku vyzařovaného ze světelného zdroje  $\Phi_z$ , který je násobený provozní účinností svítidla  $\eta_{sv}$  a příkonu světelných zdrojů  $P_{zd}$ , ke kterému se přičítá příkon předřadných zařízení  $P_{pz}$ , jednodušeji řečeno světelný tok svítidla  $\Phi_{sv}$  podělený příkonem svítidla  $P_{sv}$ .

$$\eta_{sv} = \frac{\Phi_{sv}}{P_{sv}} = \frac{\Phi_z \cdot \eta_{sv}}{P_{zd} + P_{pz}} \quad (lm \cdot W^{-1}; lm, W) \quad (3.34)$$

Když hodnotíme energetickou náročnost je měrný výkon svítidla v porovnání s provozní účinností svítidla výstižnější, neboť zahrnuje i elektrický příkon svítidla [1].

## 3.3 Vzhled

Vzhled svítidel vychází z toho, kde je budeme chtít provozovat. Svítidla využíváme v mnoha oblastech jako jsou například průmyslové objekty, venkovní/ vnitřní pracovní prostory, chodby, schodiště, garáže, silnice a mnoho dalších. Takže mimo technické parametry, zejména energetickou náročnost obvykle chceme, aby mělo svítidlo také hezký vzhled. Zejména v prostorách jako jsou výstavní síně, obchodní domy, hotely či restaurace chceme, aby bylo svítidlo vizuálně přívětivé. Hodnotí se obvykle vzhled u vypnutého i zapnutého svítidla. Vzhled svítidla se ovlivňuje jeho tvarem, velikostí, použitými materiály, povrchovou úpravou, kvalitou provedení a barvou [1].



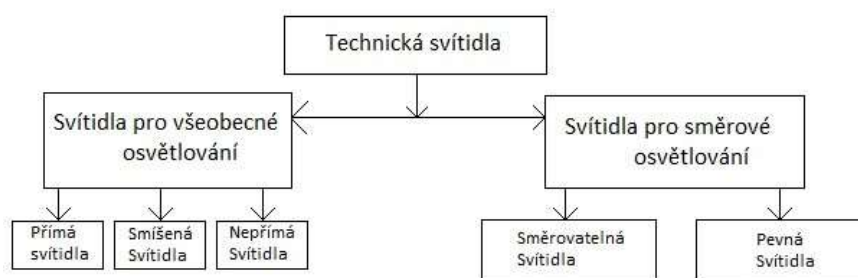
Obr. 34 Svítidlo [23]

### 3.4 Třídění a klasifikace

Slouží k základnímu rozdělení svítidel podle účelu, ke kterému jsou určena. Klasifikace je podrobnější třídění v rámci určité skupiny svítidel podle konkrétních vlastností. Jedná se o vhodnou pomůcku zejména pro inženýry a projektanty, kterým svítidla pomáhají zúžit výběr pro konkrétní situaci. Třídění svítidel je složitější oproti třídění světelných zdrojů, jelikož není tak jednoznačné. Svítidla se dělí mimo jiné i podle způsobu účelu a použití. Obvykle se stává, že jeden typ svítidla lze využít ve více odlišných aplikacích. Svítidla lze rozdělit pro konkrétní účel a oblast použití. Podle účelu lze rozdělit do tří základních skupin: technická svítidla, dekorační svítidla, orientační a signalizační svítidla. Ovšem je třeba poznamenat, že toto třídění není jednoznačné a svítidla mohou plnit i více funkcí současně. Svítidla, která jsou určena jako dekorační mohou zároveň sloužit i k osvětlení prostoru.

#### 3.4.1 Technická svítidla











Jsou primárně určena pro osvětlení vnitřních a venkovních prostor. Rozdělujeme je do dvou skupin: svítidla pro všeobecné osvětlování, která jsou vhodná pro osvětlení prostoru jako celku, a svítidla pro směrová osvětlování, která jsou vhodná pro směrová osvětlování, zejména pro osvětlení vybrané části prostoru nebo ke světelnému zdůraznění vybraných předmětů. Rozdělení technických svítidel (viz obr. 35).



Obr. 35 Třídění technických svítidel [1]

##### 3.4.1.1 Svítidla pro všeobecné osvětlování

Jsou určena k osvětlování prostoru a míst zrakového úhlu. Využívají se dva základní světelně technické parametry: pásmové toky a fotometrická plocha svítivosti neboli křivky svítivosti [1].

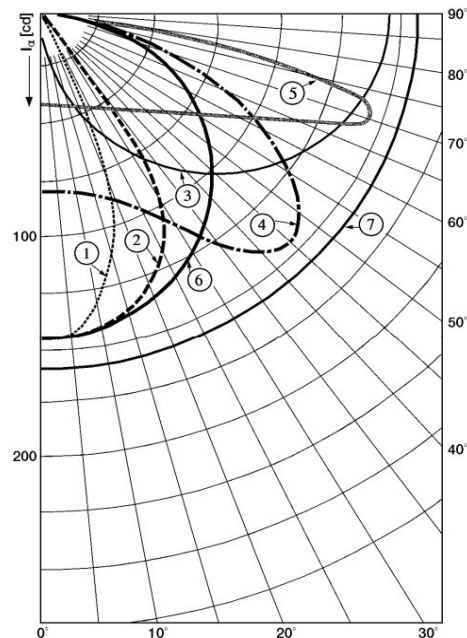
Označení	Svítidlo	Světelný tok do dolního poloprostoru	Světelný tok do horního poloprostoru	Příklad křivky svítivosti	Obrázek
A	Přímé	100 – 90 %	0 – 10%		
B	Převážně přímé	90 – 60 %	10 – 40%		
C	Smíšené	60 – 40 %	40 – 60%		
D	Převážně nepřímé	40 – 10 %	60 – 90%		
E	Nepřímé	10 – 0%	90 – 100%		

Obr. 36 Třídění svítidel pro všeobecné osvětlování [1]

Svítidlům bylo přiřazeno příslušné označení a popis dle tab. 6. Toto označení se určuje podle činitele tvaru křivky svítivosti  $K_F$  pro dolní nebo horní poloprostor. To můžeme vidět na obr. 37, který obsahuje grafický popis různých tvarů křivek svítivosti svítidel z tab. 6 pro všeobecné osvětlování.

Tab. 6 Klasifikace svítidel podle činitele tvaru křivky [1,27]

Označení	Název	$K_f$ (-)	Pásmo úhů $I_{\max}$ (°)
1	Koncentrovaná	3 a více	0°-15°
2	hluboká	2 až 3	0°-30° 180°-150°
3	sinová	více než 1,3; $I_{\min}$ menší než 0,7 $I_{\max}$	70°-90° 110°-90°
4	pološiroká	více než 1,3	35°-55° 145°-125°
5	široká	více než 1,3	55°-85° 95°-125°
6	kosinová	1,3 až 2	0°-35° 180°-145°
7	rovnoměrná	méně než 1,3; $I_{\min}$ větší než 0,7 $I_{\max}$	0°-180°



Obr. 37 Klasifikace svítidel podle činitele tvaru křivky [27]

Z tvarů křivek svítivosti vychází poměrně známý systém klasifikace svítidel, nazývá se Britský systém, zkratkou BZ (British zone). V tomto systému jsou svítidla rozdělena podle určité funkce křivky svítivosti do deseti tříd (viz obr. 38). Tato klasifikace, která vychází z tvaru fotometrické roviny je velice složitá, neboť je hodnocen tvar křivek svítivosti, který může být velice rozmanitý. Navíc v každé polorovině C může být jiný, a proto se velmi složitě stanovují hranice, ve kterých jsou svítidla klasifikována v jedné klasifikační třídě. Vzniklo mnoho různých konstrukčních řešení například: dolnozářiče, hornozářiče, širokozářiče, hlubokozářiče nebo uliční svítidla [1].

Třída	Funkce křivky svítivosti
BZ 1	$I_{\alpha} = I_0 \cdot \cos^4 \alpha$
BZ 2	$I_{\alpha} = I_0 \cdot \cos^3 \alpha$
BZ 3	$I_{\alpha} = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$
BZ 4	$I_{\alpha} = I_0 \cdot \cos^{1,5} \alpha$
BZ 5	$I_{\alpha} = I_0 \cdot \cos \alpha$
BZ 6	$I_{\alpha} = I_0 \cdot (1 + 2 \cos \alpha)$
BZ 7	$I_{\alpha} = I_0 \cdot (2 + \cos \alpha)$
BZ 8	$I_{\alpha} = I_0$
BZ 9	$I_{\alpha} = I_0 \cdot (1 + \sin \alpha)$
BZ 10	$I_{\alpha} = I_0 \cdot \sin \alpha$

Obr. 38 Klasifikace svítidel podle BZ křivek [27]



## 4 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Toto měření by mělo objasnit vliv polohy svítidla s úzkou vyzařovací charakteristikou v kulovém integrátoru, a zjistit v jaké poloze se naměřený světelný tok nejvíce shoduje s měřením na goniofotometru, který považujeme za přesný.

### 4.1 Místo měření

Měření proběhlo ve světelné laboratoři, která se nachází ve škole Vysoké učení technické v Brně na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na ústavu elektroenergetiky v budově T12 v místnosti Sa5.11.

### 4.2 Měřená svítidla

K měření jsou zvoleny 3 LED svítidla značky Anolis, které vidíme na obr.39. Zleva je to větší RGB LED 7°, uprostřed je RGB LED 16°, a vpravo je White LED 18°, hodnoty vyzařovacích úhlů jsou změřené pomocí goniofotometru, srovnání s udávanými hodnotami můžeme najít v tab. 7. Byly zvoleny tyto svítidla, protože mají úzkou vyzařovací charakteristiku a jsou vhodné k měření vlivu polohy svítidla v kulovém integrátoru. Svítidla jsou vyvedena konektorem RJ45, který se zapojoval do driveru, ve kterém je možné velké množství nastavení, například jako snížení nebo zvýšení jasu, problikávání a zapínání jednotlivých složek RGB. Pro měření byla svítidla nastavena na maximální výkon. Kabely od svítidel byly krátké, a proto je bylo nutné prodloužit. K prodloužení byla použita spojka, a prodlužovací pětimetrový kabel, což byla dostatečná vzdálenost, která byla potřeba, pro měření na goniofotometru a v kulovém integrátoru, kde je použita stejná prodlužovací sestava.

#### 4.2.1 Výroba konstrukce pro uchycení svítidla k měření na goniofotometru.

Po několika návrzích konstrukce svítidla, se zvolila ta, která by mohla fungovat i pro uchycení v kulovém integrátoru. Použily se dva hliníkové díly tvaru písmene U a dva hliníkové díly tvaru písmene I, které po sestavení tvoří jeden celek (viz obr. 39). Tato konstrukce dostatečně vyhovuje uchycení pro měření na goniofotometru, a navíc je vhodná i pro budoucí natáčení svítidla při měření světelného toku v kulovém integrátoru. Přestože se měří tři svítidla, byly vyrobeny jen dvě konstrukce, jelikož dvě menší svítidla mají stejný průměr, a může být použita pouze jedna konstrukce pro obě menší svítidla.



Obr. 39 a) Hliníkové díly pro konstrukci svítidel b) Sestavená konstrukce se svítidlem

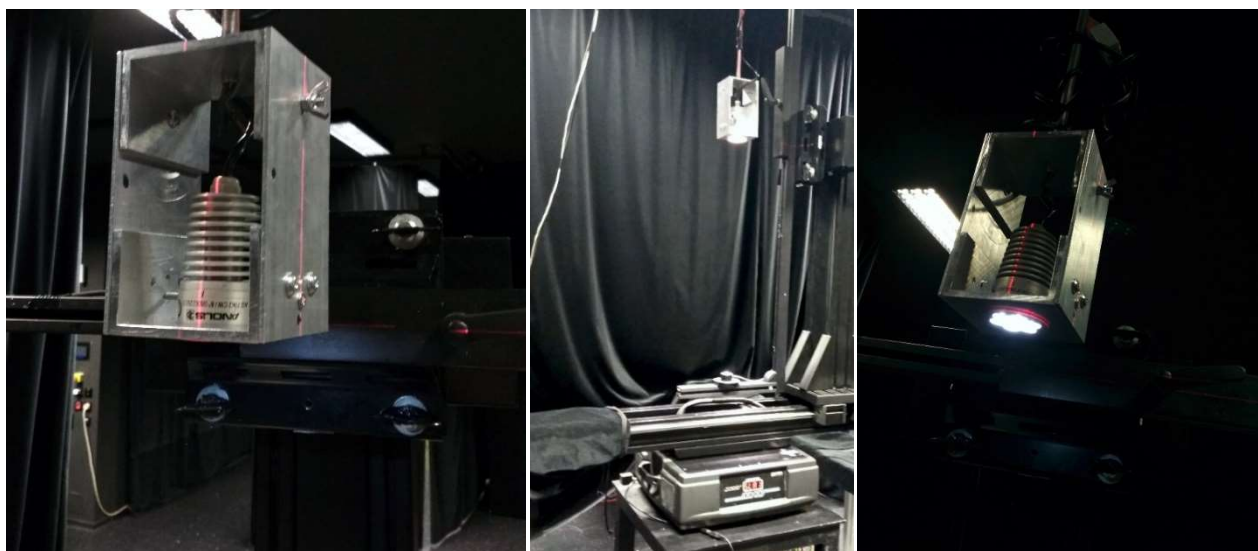
### 4.3 Měření na goniofotometru

Nejdříve je nutné svítidla změřit na goniofotometru, za účelem výpočtu světelného toku z naměřených křivek svítivosti, ze kterého vycházíme při určení žádaného světelného toku pro měření v kulovém integrátoru.

#### 4.3.1 Upevnění svítidel na goniofotometru

Konstrukce se svítidlem byla našroubována na tyč, která byla zavěšena na strop. Svítidlo bylo srovnáno na střed, který byl zvolen v části svítidla přesahující konstrukci a vyrovnán pomocí laserů.

Na obr. 40 a) vidíme pohled na svítidlo ze spodní strany. Dále na obr. 40 b) a obr. 40 c) můžeme vidět, jak bylo svítidlo zachyceno, aby se kolem něj mohlo rameno goniofotometru otáčet. Svítidlo bylo zavěšeno, aby bylo přesně uprostřed otočných os goniofotometru a bylo měřeno po ustálení teploty.



*Obr. 40 a) Konstrukce b) Uchycení konstrukce c) Zapnuté svítidlo v konstrukci*

### 4.3.2 Postup měření na goniofotometru

V driveru (označení ArcPower 36) bylo nastaveno svítidlo, aby svítilo maximálním výkonem. Napájení driveru bylo provedeno pomocí zdroje Diametral Model: AC250K2D-S. Po jeho upevnění se nechalo ustálit, a jelikož se jednalo o LED, jejich ustálení trvalo déle. Měření bylo zpracováváno na počítači v programu gryp, který ho spustí, až pokud se světelný tok během 15 minut ustálí s maximální odchylkou 0,5 %, nebo se po čtyřech hodinách pustí samo. Měření u dvou svítidel se spustilo automaticky po čtyřech hodinách a jedno se spustilo při ustálení světelného toku, již po dvou hodinách. Při jakých podmínkách měření probíhalo můžeme vidět na obrázcích č. 41 a) a b). Všechny věci v laboratoři, které by mohly odrážet světlo byly zakryty černou látkou, při zatažených černých neodrazivých závěsech, aby měření bylo co nejpřesnější. Pohyb goniofotometru byl stanoven v rovině C po 5 stupních a v rovině  $\gamma$  po 2 stupních. Začalo se s měřením White LED 18° se světelným tokem 256,7 lm, poté následovala RGB LED 16° se světelným tokem 188,4 lm. V průběhu měření byla demontována z konstrukce White LED 18° a nahrazena RGB LED 16°, u které byl naměřen světelný tok 150,1 lm. Změřilo se také prostorové rozložení zářivého toku, které můžeme vidět v 3D grafu na následující stránce vyobrazené v obr. 42, 43 a 44. Prostorové rozložení zářivého toku bylo vykresleno v programu Ray-Viewer. Z křivek svítivosti se určily vyzařovací úhly pro jednotlivé LED svítidla. Podle hodnot vyzařovacích úhlů jsou LED v této práci pojmenovány.

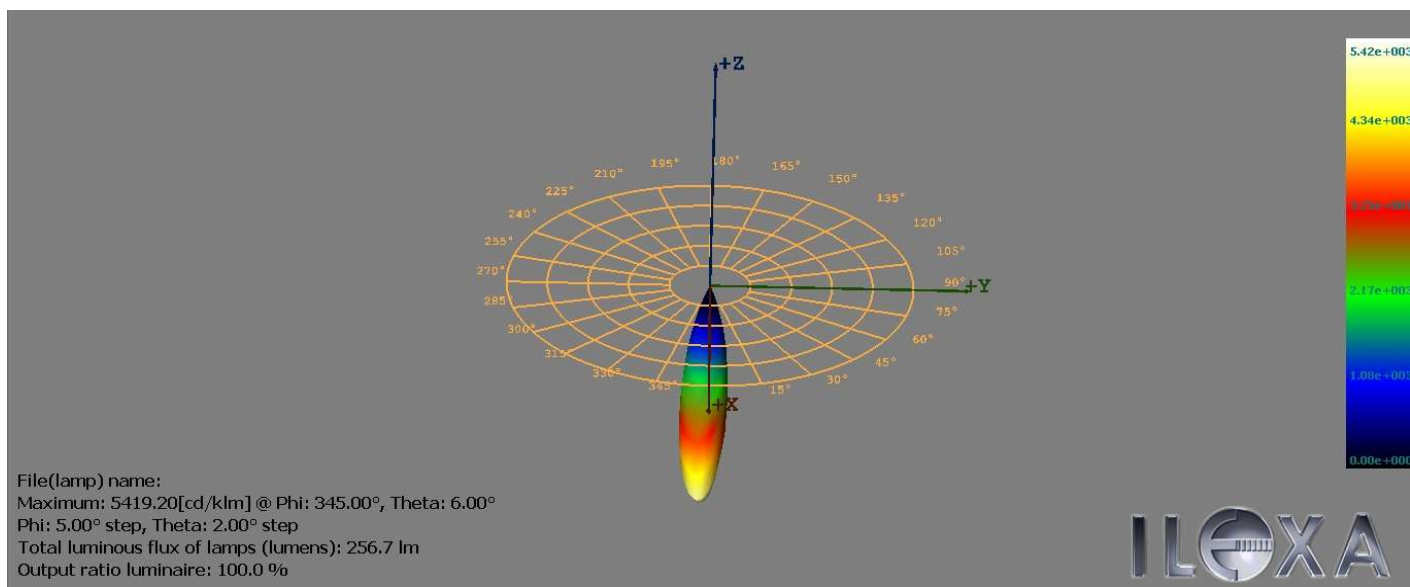
Tab. 7 Měření na goniofotometru

ANOLIS svítidla	RGB LED 7°	RGB LED 16°	White LED 18°
Označení	ArcSource Outdoor 4 MC SW Flood	AS 4 MC 23°	AS 7/K2 CW/ 6°
Výr. č.	1200371852	1200358040	0800226037
Činný příkon (W)	5	4.4	-
Světelný tok (lm)	188.4	150.1	256.7
Úhel vyzařování (výrobce)	-	23°	6°
Úhel vyzařování (Změřený)	7°	16°	18°

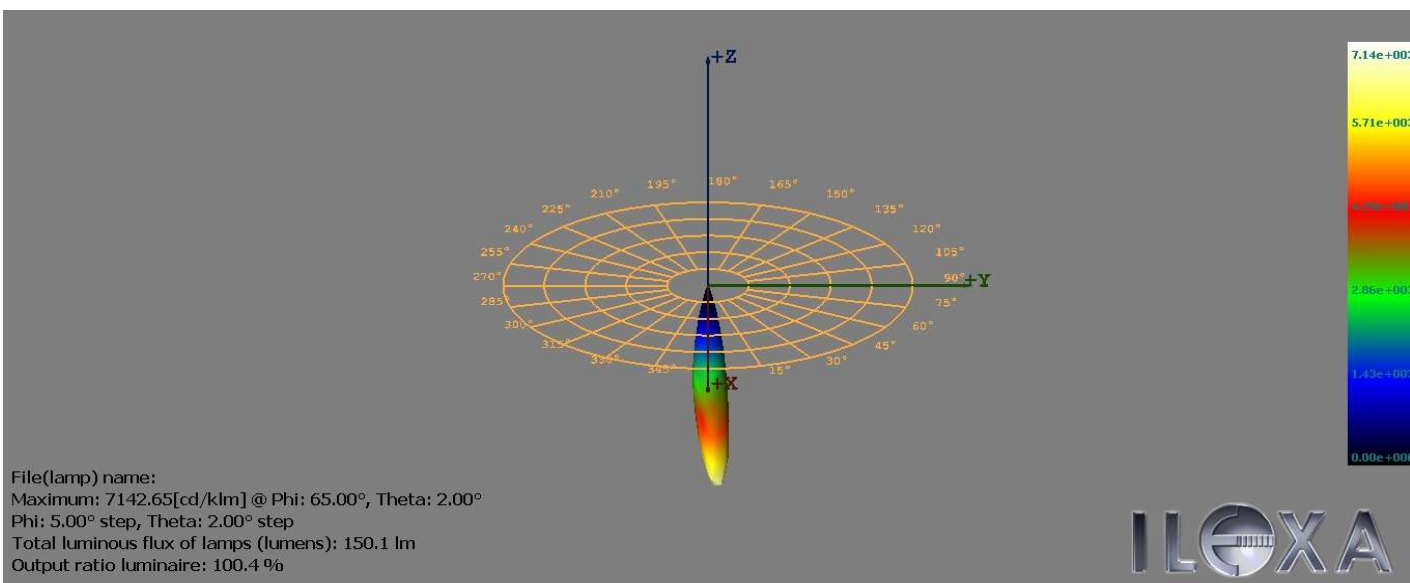


Obr. 41 a) Měření na goniofotometru-pohled z boku b) měření na goniofotometru-pohled zepředu

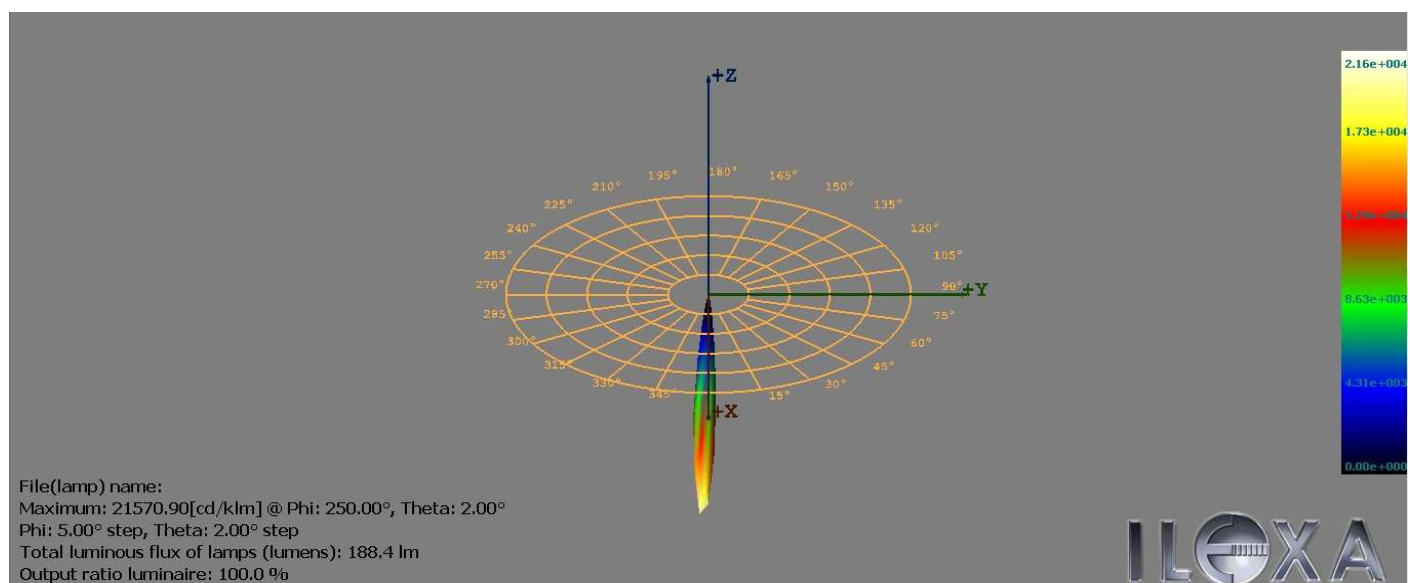




Obr. 42 Prostorové rozložení zářivého toku White LED 18°



Obr. 43 Prostorové rozložení zářivého toku RGB LED 16°



Obr. 44 Prostorové rozložení zářivého toku RGB LED 7°

## 4.4 Měření v kulovém integrátoru

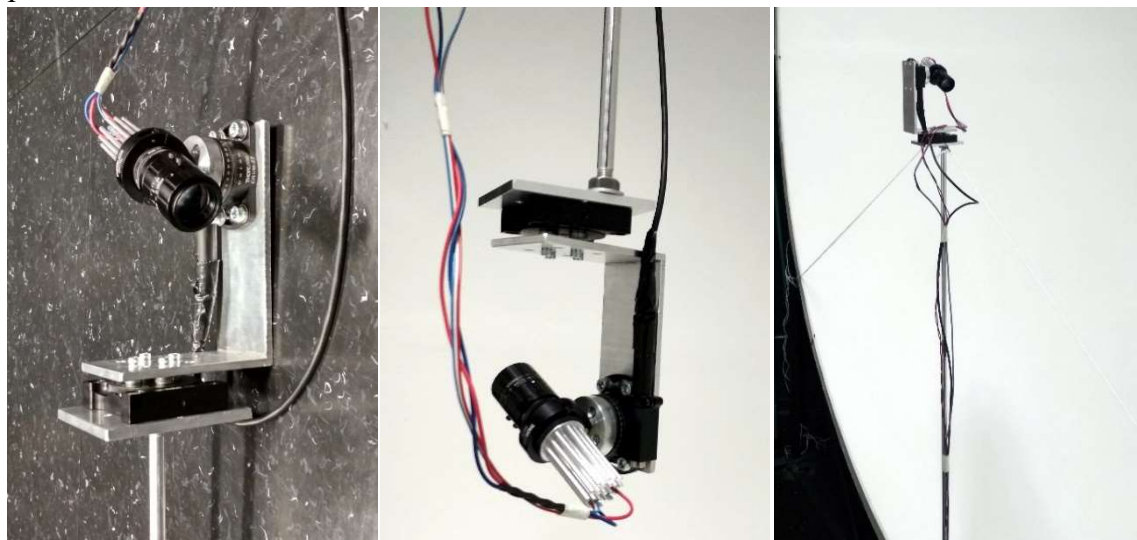
Následně se přesuneme k měření v kulovém integrátoru. Začneme s měřením uniformity kulového integrátoru, která se může zjistit pomocí kolimátoru, který představuje optický přístroj s LED, clonou, objektivem, kterým prochází světelný paprsek, který promítá na vnitřním povrchu KI uniformní kruh o průměru 8 cm. S tímto kolimátorem je třeba svítit na jednotlivé body kulového integrátoru a díky němu je možné zjistit uniformitu v jednotlivých místech. Dalším bodem je vymyslet a navrhnout uchycení kolimátoru v kulovém integrátoru.

### 4.4.1 Uchycení kolimátoru v kulovém integrátoru

Otáčení kolimátoru bylo realizováno pomocí dvou servomotorů, které mu umožní pohybovat se v rovinách  $C$  a  $\gamma$  automaticky přes program Kinesis v počítači. Konstrukce kolimátoru je přišroubována na tyči ze spodu kulového integrátoru pro měření vrchní polokoule a z vrchní části kulového integrátoru pro měření spodní polokoule. Bohužel se servomotor pro rovinu  $C$  porouchal a byl nahrazen ručním úhloměrem, pomocí kterého byly ručně nastavovány  $C$  roviny. Pro lepší stabilitu je konstrukce přivázaná dvěma provázky, které drží kolimátor uprostřed, aby zamezovaly naklánění do stran po zavření kulového integrátoru. Na obr. 45 a) a b) můžeme vidět uchycení pro měření spodní polokoule.

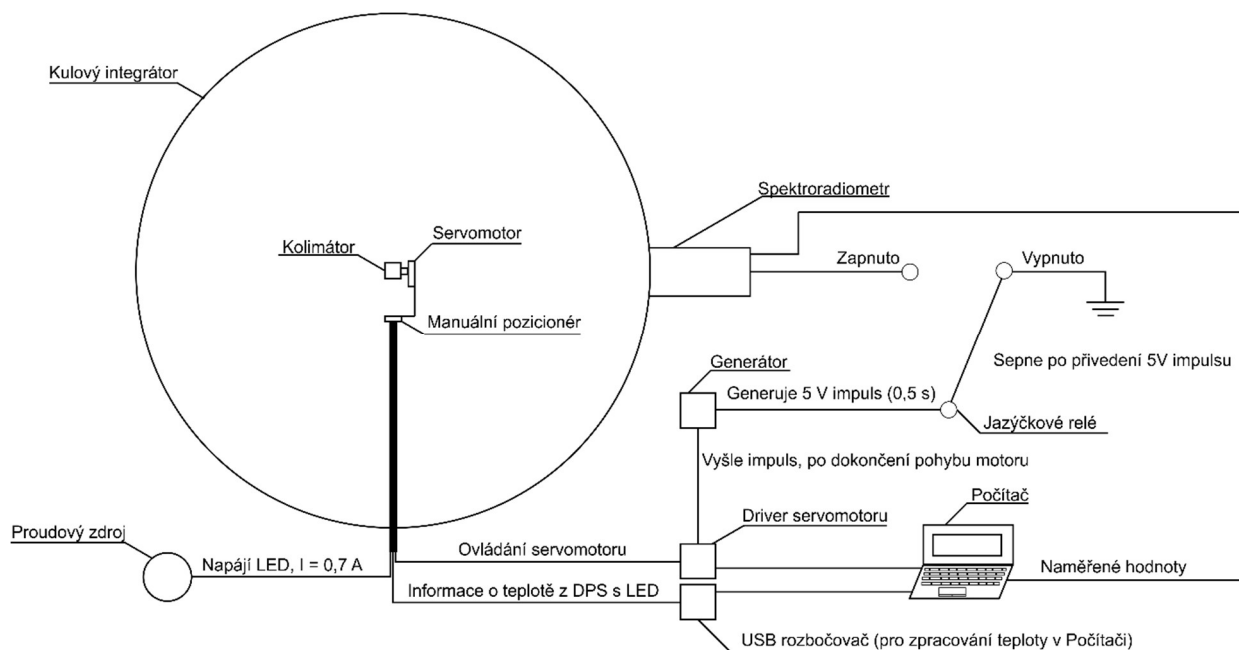
### 4.4.2 Postup měření kolimátorem

Měření probíhalo automaticky v rovině  $\gamma$  pomocí jednoho servomotoru, který po nastavení určitého úhlu poslal na výstup signál, který byl zesílen pomocí generátoru Rigol, který na svůj výstup poslal 5 voltový krátký impuls, čímž se sepnulo 5 voltové jazýčkové relé, díky čemuž se spojily kontakty spektoradiometru, a ten na základě tohoto signálu spustil měření. Bylo potřeba v programu Kinesis vytvořit sekvenci úkolů, které bude servomotor vykonávat schéma měření na obr. 46. Natáčení v  $\gamma$  rovině probíhalo po 5 stupních, a pokaždé, když se posunul o 5 stupňů, měl v sekvenci nastaveno počkat 35 vteřin, což byl čas potřebný pro samotné integrování a zpracování dat programem JeTi Vival ve kterém se měřila spektrální zář. Jakmile byla rovina  $\gamma$  změřená, musel být otevřen kulový integrátor a pootočilo se s kolimátorem manuálně v rovině  $C$ . Poté se znovu kulový integrátor zavřel a spustila se další sekvence měření, dokud nebyly změřeny všechny vytyčené body. Následně se tento postup opakoval pro měření spodní polokoule. V průběhu měření se zaznamenávaly průběhy teploty bodů v otvoru koule a na desce plošných spojů v blízkosti LED čipu v kolimátoru.



Obr. 45 a) Kolimátor b) Měření spodní polokoule c) Měření vrchní polokoule

### 4.4.3 Schéma měření



Obr. 46 Schéma měření s kolimátorem

#### 4.4.3.1 Seznam přístrojů:

- Proudový zdroj pro napájení LED, označení KEITHLEY 2601 B, výr. č. 4031044 / 07430/06-ECZ
- Zdroj pro korekční žárovku, označení EA-PSI 5200-10 A
- Generátor, označení RIGOL DG 4162, výr. č. DG4E163251447
- Jazýčkové relé, označení KUAN HSI S2A051000 / A95
- Spektroradiometr, označení JETI scb1211UV, výr. č. 2015926
- Kulový integrátor, označení Integrátor kulový průměr 2,5 m s pojez. konstr. výr. č. 313808
- Driver motoru, označení Thorlabs Brushed motor controller, výr. č. 27501076 / 2016
- Servomotor, označení Thorlabs CR1/M-Z7
- Kolimátor
- Usb rozborovač
- Počítač

#### 4.4.3.2 Kalibrace přístrojů:

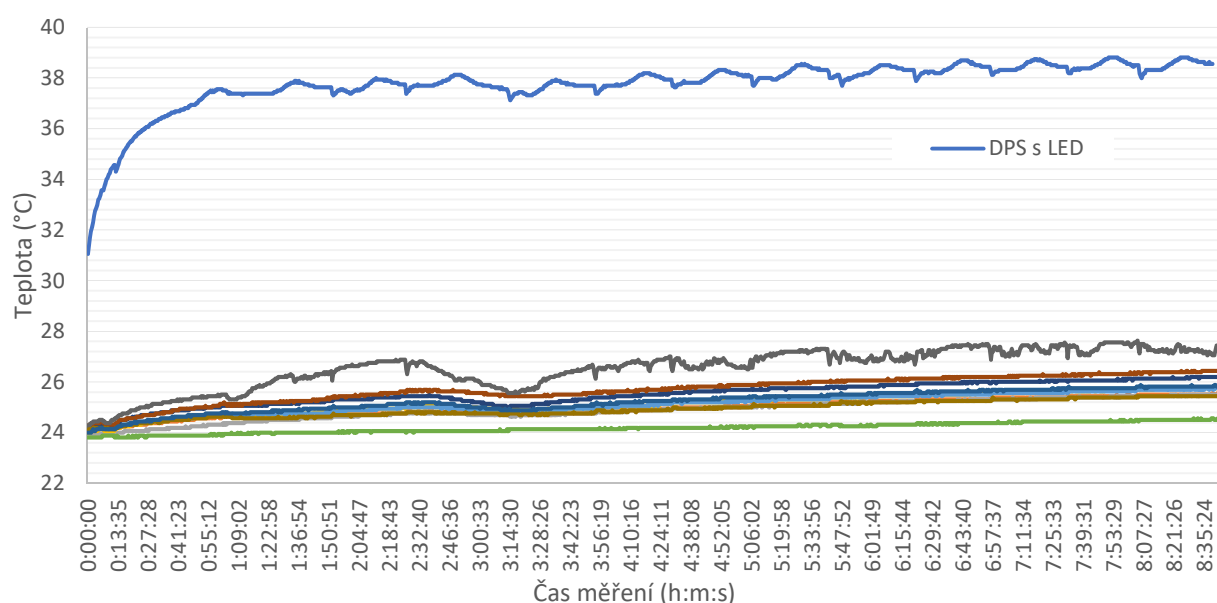
Spektroradiometr byl kalibrován 29.8.2018.

Kulový integrátor byl kalibrován na podzim roku 2018.

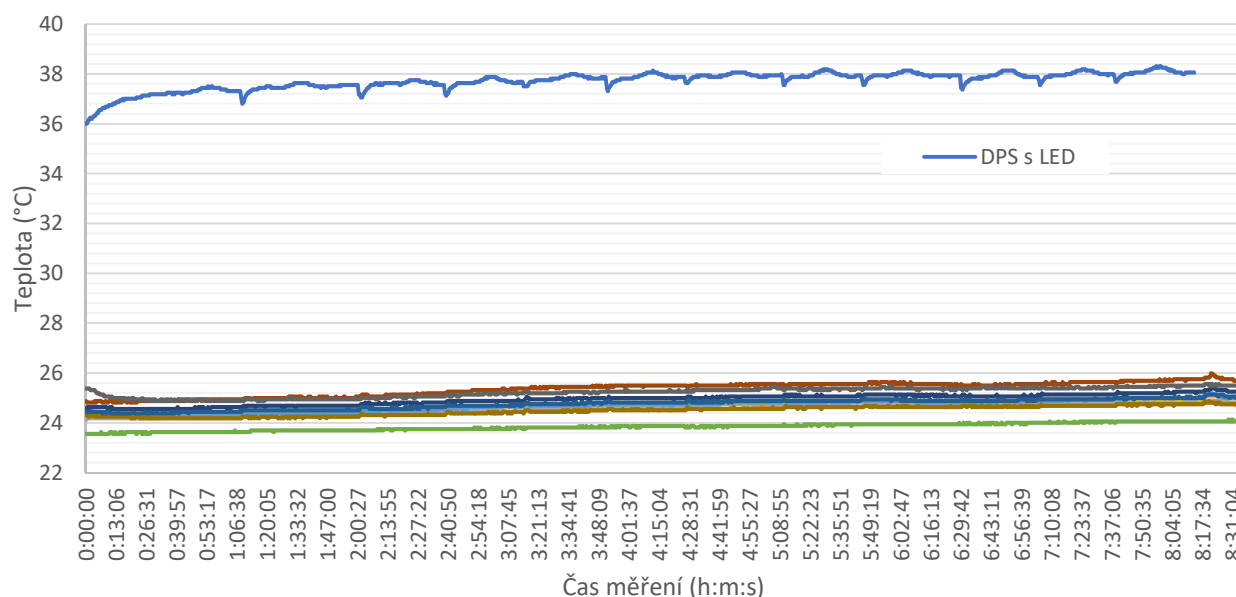
Luxmetr PRC Krochman Radiolux 111 je kalibrován pravidelně každý rok.

#### 4.4.4 Záznam teploty, při měření kolimátoru v kulovém integrátoru

Při měření uniformity koule pomocí kolimátoru, byla zaznamenána teplota jednotlivých čidel rozmístěných po obvodu kulového integrátoru podél jeho otvoru pro otevření, a jedno čidlo teploty měla také LED na svém čipu. Na obr. 47 můžeme vidět, jak se pohybovaly teploty jednotlivých čidel po obvodu kulového integrátoru, a také jak rostla teplota LED, přičemž k jejímu ustálení došlo po necelé hodině na 37,5 °C, kdy začalo měření. Poté můžeme vidět v jakých časech měření se kulový integrátor otevíral, neboť na grafu si můžeme všimnout ochlazení LED při každém otevření. Teplota čidel na obvodu kulového integrátoru zůstala poměrně stálá, přičemž začala na 24 °C a dostala se až k 26 °C. Pouze jedno čidlo vykazuje podle grafu vyšší teplotu, a to může být způsobeno tím, že se jedná o horní čidlo, kde je vyšší teplota než ve zbytku kulového integrátoru, nebo to, že LED svítila do horní polokoule a vrchní čidlo se zahřívalo tedy více. Můžeme vidět, že při měření spodní polokoule na obr. 48 byly teploty již srovnatelnější.



Obr. 47 Teplota při měření vrchní polokoule



Obr. 48 Teplota při měření spodní polokoule

#### 4.4.5 Postup měření svítidel v kulovém integrátoru

Po změření uniformity pomocí kolimátoru, byly vybrány místa, kam by se svítidlo mohlo nasměrovat za účelem, co nejpřesnějšího měření světelného toku. Byla vytvořena stupnice s čísly úhlů v rovinách  $C$  a  $\gamma$ , a pro tyto stupnice byla vymyšlena nehybná ryska, která po natočení svítidla do určité polohy ukazovala úhel natočení v jednotlivých rovinách (viz obr. 49 b)). Pomocí tohoto naklápěcího systému bylo možno svítidlo namířit do určených oblastí, které byly získány při měření kolimátorem. Pro každé nastavení souřadnic  $C$  a  $\gamma$  bylo potřeba otevřít kouli a nastavit ručně nové souřadnice. Konstrukce tedy nepotřebovala mnoho úprav na rozdíl od měření na goniometru.



Obr. 49 a) Svítidlo v kulovém integrátoru b) Konstrukce pro natáčení svítidel

#### 4.4.6 Roviny $C$ a $\gamma$

Základní polorovina  $C = 0^\circ$  ( $360^\circ$ ) obkresluje spojnicí dvou polokoulí kulového integrátoru, na obr. 50 ji můžeme vidět napravo kulového integrátoru vedle pracovního stolu. Dále pokračujeme směrem do laboratoře, kde je polorovina  $C = 90^\circ$ , která se nachází na středu polokoule, která je pohyblivá a obsahuje spektrometr, na obr. 50 ji můžeme vidět uprostřed kulového integrátoru. Polorovina  $C = 180^\circ$  připadá části, který je na obr. 50 vidět nalevo u zdi kulového integrátoru a následuje polorovina  $C = 270^\circ$ , která se nachází ve středu polokoule, která je také u zdi, ale na obr. 50 ji vidět nemůžeme. Tato polokoule obsahuje korekční žárovku.

Základní bod  $\gamma = 0^\circ$  leží na spodu kulového integrátoru. Další roviny se nachází směrem nahoru, kde v půlce kulového integrátoru po jeho obvodu leží rovina  $\gamma = 90^\circ$ , a poslední bod  $\gamma = 180^\circ$  leží nahoře kulového integrátoru (viz obr. 50).



Obr. 50 Kulový integrátor s průměrem 2,5 m



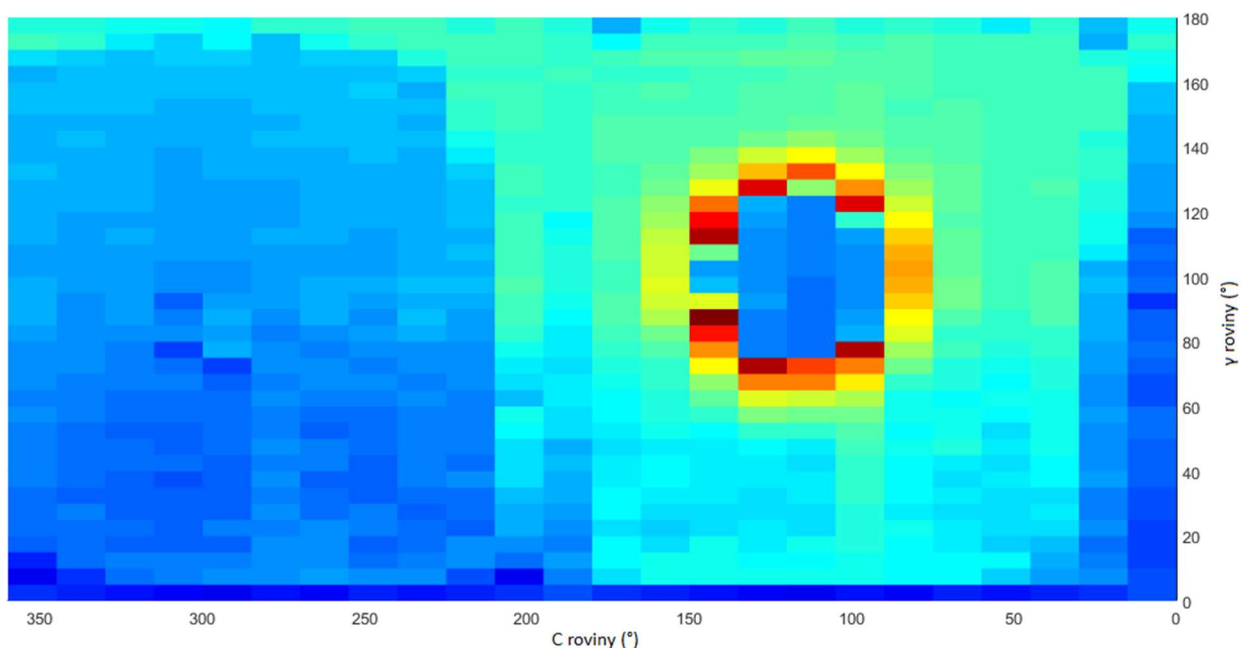
## 4.5 Zpracování výsledků

Po změření hodnot na goniofotometru a kulovém integrátoru následovalo zpracování výsledků, které probíhalo pomocí programů Ray-Viewer, a LDT editor, které byly vhodné pro zpracování hodnot z goniofotometru. Následně byly exportovány data změřené v kulovém integrátoru z programu JeTi Vival a zpracovali je v excelu. Z prvního měření uniformity pomocí kolimátoru byly získány hodnoty intenzity v jednotlivých bodech, které byly poděleny průměrnou hodnotou intenzity, tím byla získána poměrná hodnota 1 (stupnice na obr. 53), která bude znázorňovat průměrné měření intenzity. Hodnoty pod 1 znázorňují, kde bude kulový integrátor podměřovat oproti průměru, a hodnoty nad 1 znázorňují, kde bude kulový integrátor přeměřovat oproti průměru. Dále byla provedena korekce kulového integrátoru pro měření svítidel, kdy bylo změřeno deset hodnot s korekční žárovkou a prázdným kulovým integrátorem, a následně s korekční žárovkou a umístěným vypnutým svítidlem. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány, a provedli korekci hodnot pro vlnové délky 380–400 nm, kde má korekční žárovka z důvodu nevýrazné modré složky problém měřit správně. Následně se podělili průměrnou hodnotu spektra pro prázdnou kouli průměrnou hodnotou spektrem, kdy je v kouli zhasnuté svítidlo. Tato korekci se potom zprůměrovala a vynásobila naměřeným světelným tokem jednotlivých svítidel v určených oblastech. Následně byly podle naměřených hodnot vytvořeny výsledné grafy v programu Matlab.

Byla provedena také opakovatelnost měření na kolimátoru, kde byla z patnácti hodnot měření zjištěna směrodatná odchylka  $U_a < 0,43 \%$ .

### 4.5.1 Původní povrchový graf v programu Matlab

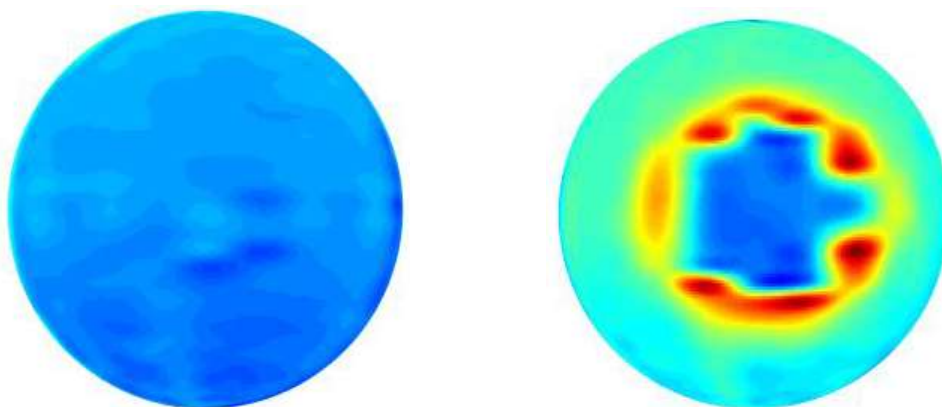
Bylo třeba stanovit do kterých míst budou svítidla svítit, to bylo provedeno pomocí povrchového grafu. Zde je ukázka naměřeného grafu s původními hodnotami bez interpolace (viz obr. 51).



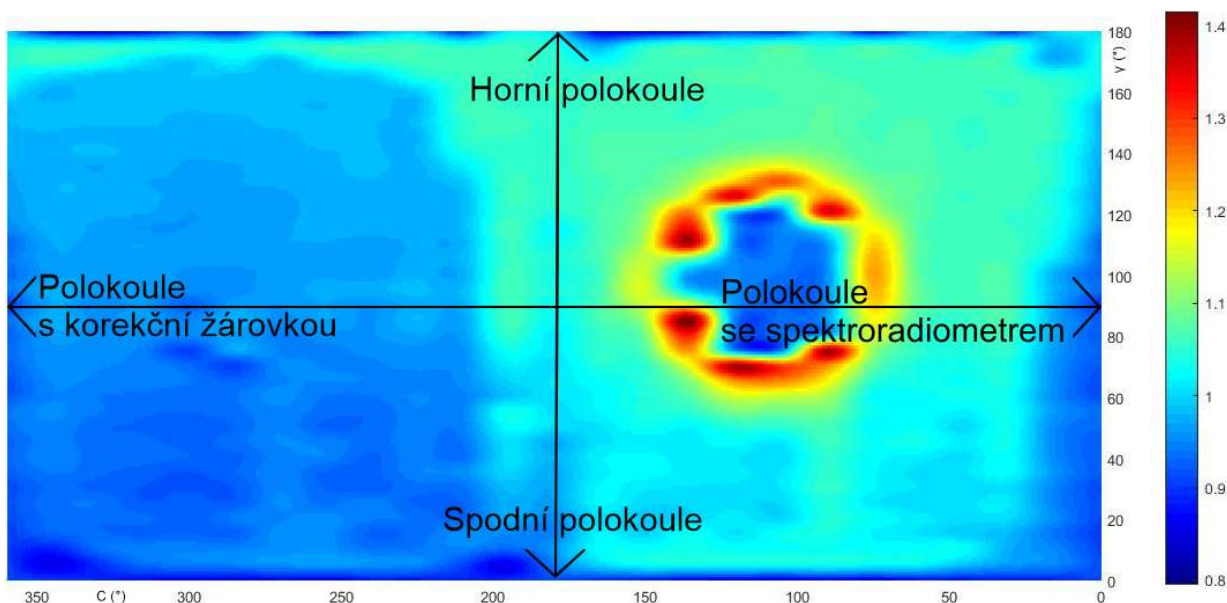
Obr. 51 Původní povrchový graf v programu Matlab

### 4.5.2 Uniformita kulového integrátoru

V další části práce byla pomocí programu Matlabu vykreslena a zinterpolována koule z původních  $5^\circ$  v rovině  $\gamma$ , a z  $15^\circ$  v rovině  $C$  na  $1^\circ$  v obou rovinách. Tato koule znázorňuje uniformitu vnitřního povrchu koule. Na obr. 52 a) vidíme vnitřní povrch nepohyblivé polokoule. Jedná se o polokouli, kde je umístěna clonka, pod kterou se nachází korekční žárovka, která měření příliš neovlivní. Můžeme si všimnout drobného výraznějšího zbarvení uprostřed koule, které znázorňuje právě zmíněnou clonu. O této polokouli můžeme říct, že zde podměřuje, podle jejího modrého zbarvení. Naopak na obr. 52 b) vidíme pohyblivou polokouli na které se nachází spektorradiometr, a o této polokouli můžeme říct, že hodnoty na ní budou přeměřené, jelikož se zde nachází spektorradiometr, který je zde ve větší blízkosti, na rozdíl od druhé polokoule, kde se nachází korekční žárovka. Můžeme vidět silně přeměřené hodnoty po obvodu clonky, kde světlo dopadne za clonku, a odráží se za ní, tudíž spektorradiometr zaznamená větší intenzitu, a naměřené hodnoty podstatně přeměří. Tyto obrázky pomohou přiblížit následující povrchový graf kulového integrátoru, který byl také vytvořen v programu Matlab a zinterpolován na  $1^\circ$  viz obr. 53. Zde vidíme body, kam byla namířena svítidla s úzkou vyzářovací charakteristikou. Vrchní a spodní polokouli rozděluje přímka pro  $\gamma = 90^\circ$  a otvor pro otevírání kulového integrátoru najdeme v rovinách  $C = 0^\circ$  ( $360^\circ$ ) a  $180^\circ$ . Otvor bude pravděpodobně mírně podměřovat, jelikož má světlejší odstín barev.



Obr. 52 a) Nepohyblivá polokoule b) Pohyblivá polokoule se spektorradiometrem

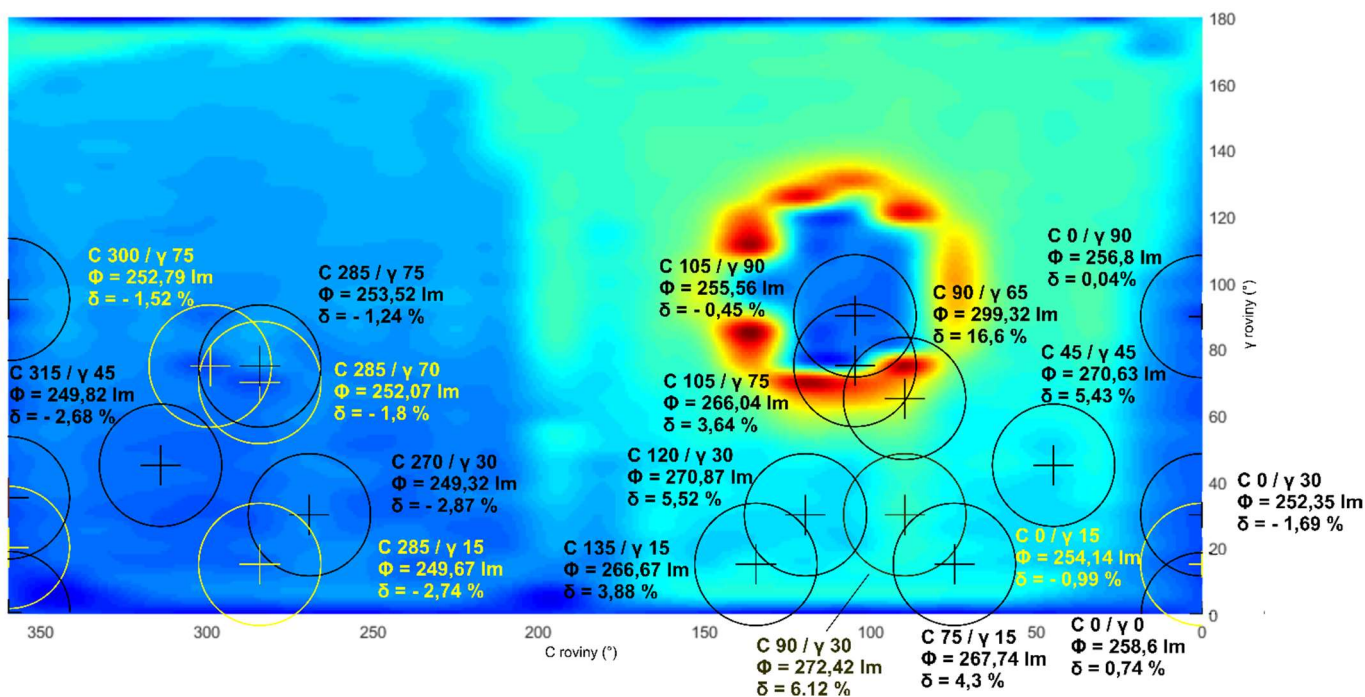


Obr. 53 Povrchový graf kulového integrátoru

### 4.5.3 Srovnání měřených bodů s goniofotometrem

Do grafického znázornění povrchu koule byly zakresleny oblasti, kam byla směřována jednotlivá svítidla. V každé oblasti, která je zakreslená v grafu, jsou popsány roviny C a  $\gamma$ , aby bylo zřejmé v jaké poloze se svítidlo nacházelo. Dále je zde světelný tok, který byl změřený v dané poloze, a v posledním řádku najdeme vypočtenou odchylku od hodnoty změřené goniofotometrem.

#### 4.5.3.1 Měření svítidla White LED 18° v kulovém integrátoru

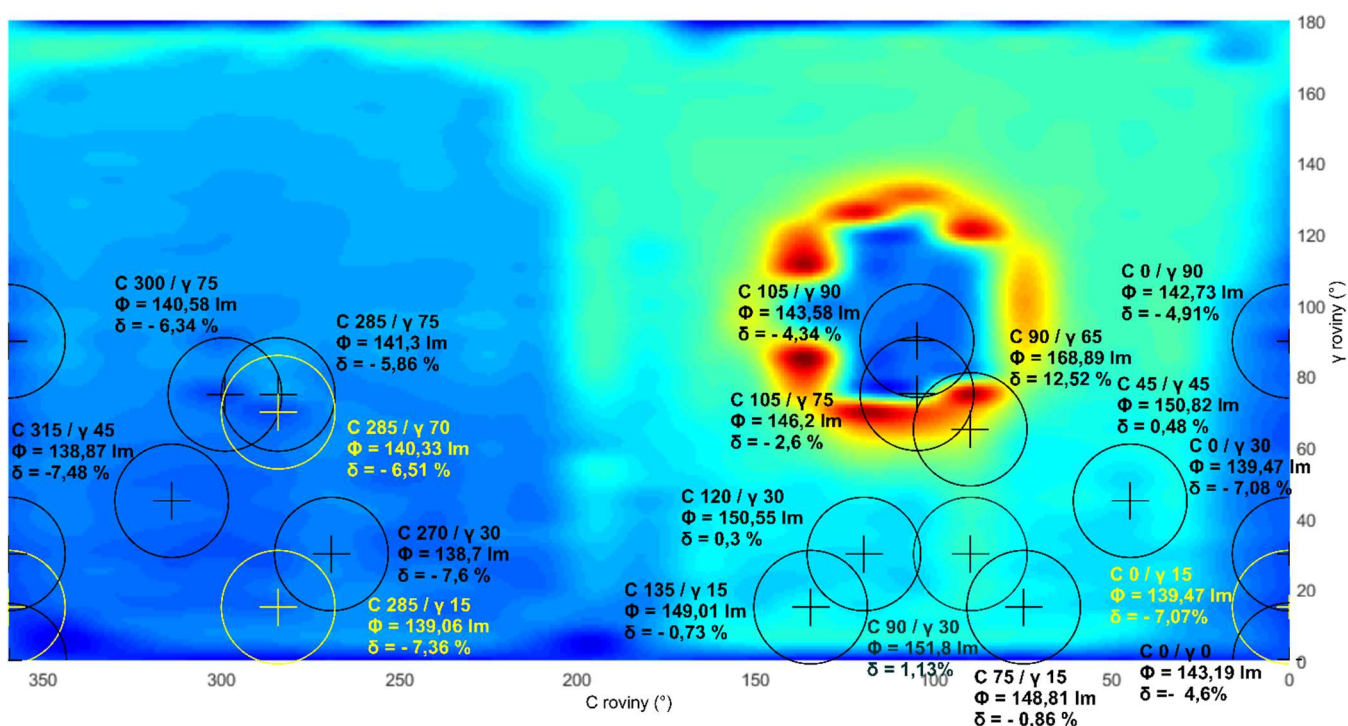


Obr. 54 Povrchový graf s polohováním White LED 18°

Pro obr. 54 vycházíme ze světelného toku  $\Phi = 256,7$  lm, který byl změřen goniofotometrem. Na grafu obr. 54, vidíme, že nejbližší k hodnotě na goniofotometru je světelný tok v poloze svítidla C0/ $\gamma$ 90, kde je odchylka pouhé 4 setiny procenta. Zatímco v okolí clonky spektorradiometru vidíme, že kulový integrátor přeměřuje oproti goniofotometru o 16,6 %.



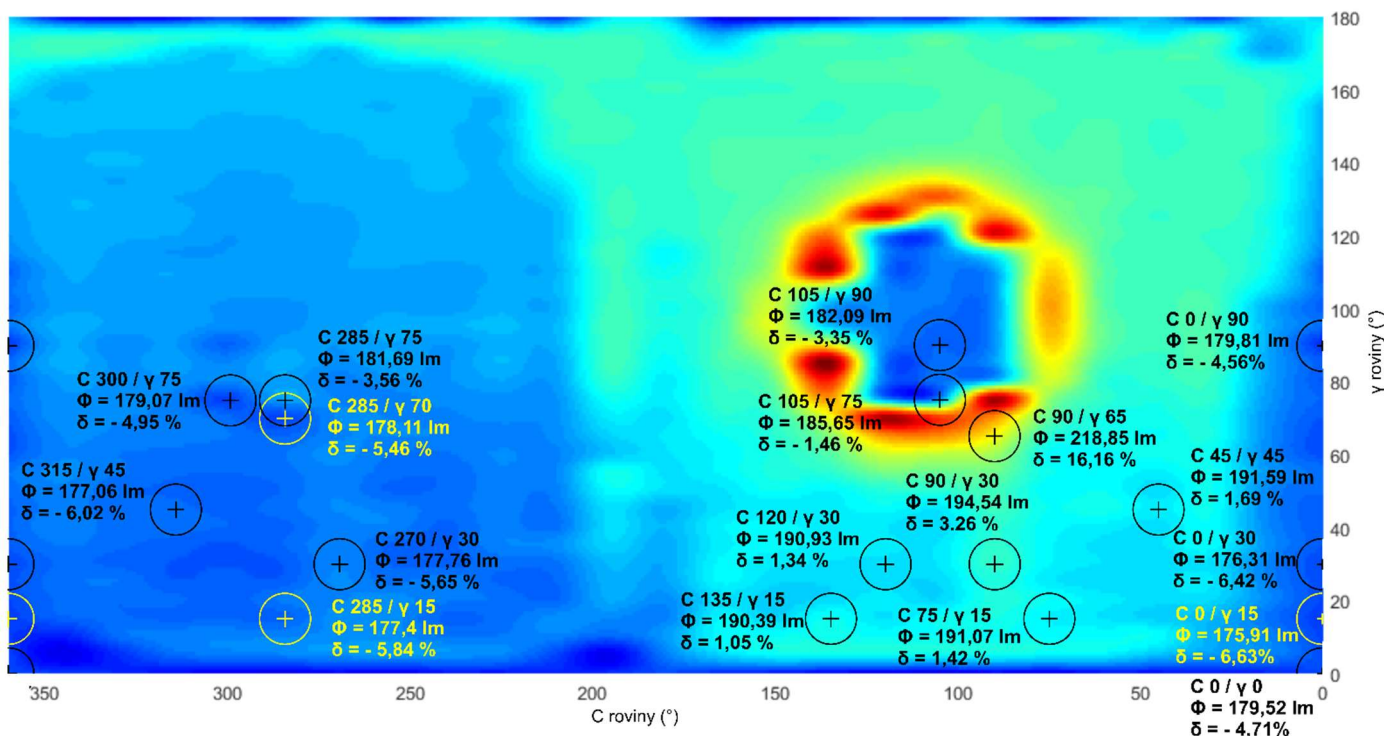
#### 4.5.3.2 Měření svítidla RGB LED 16° v kulovém integrátoru



Obr. 55 Povrchový graf s polohováním RGB LED 16°

Pro obr. 55 vycházíme ze světelného toku  $\Phi = 150,1$  lm, který byl změřen goniofotometrem. Na tomto grafu (obr. 55) vidíme, že nejlepší místo pro umístění měřeného svítidla, není v bodě C0/γ0, kde kulový integrátor oproti goniofotometru podměřuje o 4,6 %, ale najdeme ho v bodě C120/γ30, kde je odchylka pouhé 0,3 %. Naopak v bodě c90/γ65 v oblasti clonky spektorradiometru, kulový integrátor přeměřuje o 12,52 %.

#### 4.5.3.3 Měření svítidla RGB LED 7° v kulovém integrátoru



Obr. 56 Povrchový graf s polohováním RGB LED 7°

Pro obr. 56 vycházíme ze světelného toku  $\Phi = 188,4$  lm, který byl změřen goniofotometrem. Na grafu (obr. 56) vidíme, že nejlepší místo není C0/0 s odchylkou 4,71 %, ale najdeme ho v oblasti C135/γ15, kde je odchylka od goniofotometru 1,05 %.

#### 4.5.3.4 Výpočet odchylky kulového integrátoru od goniofotometru

Odchylka se v grafech (obr. 54, obr. 55 a obr. 56) vypočítá pomocí vztahu:

$$\delta = \frac{\Phi_{kul\ c/\gamma} - \Phi_{gon\ svit}}{\Phi_{kul\ c/\gamma}} \cdot 100 \quad (\%;\ lm) \quad (4.35)$$

Kde  $\Phi_{kul\ c/\gamma}$  je světelný tok změřený kulovým integrátorem v daném bodu,  $\Phi_{gon\ svit}$  je světelný tok změřený na goniofotometru pro dané svítidlo.

Příklad výpočtu chyby White LED 18° pro C0/γ0:

$$\delta = \frac{\Phi_{kul\ 0/0} - \Phi_{gon\ mala\ white}}{\Phi_{kul\ 0/0}} \cdot 100 = \frac{258,6\ lm - 256,7\ lm}{258,6\ lm} \cdot 100 = 0,74\ \%$$

## 5 ZÁVĚR

V úvodu bakalářské práce jsou shrnuty poznatky, které jsou důležité do světelné techniky a k přehledu v oblasti měření svítidel, zejména v kulovém integrátoru a goniofotometru. Jedná se o základní světelné technické parametry, funkci měřících přístrojů, popis druhů svítidel a jejich vyzařovacích charakteristik.

Byly zvoleny 3 svítidla s úzkou vyzařovací charakteristikou, pro které bylo nutné vymyslet konstrukci k uchycení do goniofotometru a kulového integrátoru. Pro měření svítidel na goniofotometru byla navržena konstrukce (viz obr. 39 a) a b)), která se skládala, ze dvou U hliníkových dílů a dvou I hliníkových dílů. Tato konstrukce byla zvolena z hlediska ulehčení následující výroby konstrukce pro kulový integrátor.

Při měření na goniofotometru byly zjištěny následující hodnoty světelného toku u RGB LED 7° je světelný tok  $\Phi = 188,4 \text{ lm}$ , u RGB LED 16° je světelný tok  $\Phi = 150,1 \text{ lm}$  a u White LED 18° je světelný tok  $\Phi = 256,7 \text{ lm}$ . Také byly vykresleny 3D grafy prostorového rozložení zářivého toku v programu Ray-Viewer. Křivky svítivosti zejména u White a RGB LED byly oproti vyzařování do úhlu 0° mírně vychýleny až o 6°, což bylo způsobeno křivým závitem, který byl na následující měření v kulovém integrátoru spraven, aby byl kolmý.

Před měřením svítidel v kulovém integrátoru bylo třeba změřit uniformitu kulového integrátoru pomocí kolimátoru s LED světelným zdrojem. Pro kolimátor byla vymyšlena konstrukce, která zajišťovala jeho pohyb v kulovém integrátoru, který byl v rovině  $\gamma$  zautomatizován, a v rovině  $C$  byl použit manuální pohyb. Změřené hodnoty byly vztaženy k průměrné hodnotě, aby byla průměrná hodnota rovna 1. Na grafech (obr. 51, 53) můžeme vidět, že v oblasti okraje clonky spektrometru, fotočlánek hodnoty přeměřuje, ale za to v okolí clonky korekční žárovky, nebo při namíření svítidla na clonku spektrometru, naměříme podměřené hodnoty. Na obr. 54, 55, 56 vidíme porovnávání hodnot světelného toku v jednotlivých polohách při měření v kulovém integrátoru s hodnotou při měření na goniofotometru.

Měřením bylo zjištěno, že pro RGB LED 7° byla nejvhodnější oblast C135/ $\gamma$ 15 s odchylkou 1,05 %, nikoliv tedy hodnota C0/ $\gamma$ 0, kam se svítidlo zpravidla směřuje, kde byla odchylka 4,71 % a největší odchylka od goniofotometru byla v okolí kraje clonky, a to 16,16 %. Pro RGB LED 16° bylo nejlepší místo také v podobné oblasti jako pro RGB LED 7°, a to v c120/ $\gamma$ 30, kde byla chyba 0,3 %, zatímco v bodě C0/ $\gamma$ 0 byla chyba 4,6 %. Nejhorším místem byla opět oblast kolem clonky spektrometru, kde chyba dosahovala až 12,52 %. White LED 18° měla oblast největší shody s goniofotometrem v oblasti C0/ $\gamma$ 90, kde byla odchylka 0,04 %. Tato LED narozdíl od předchozích dvou svítidel měla v bodě C0/ $\gamma$ 0 menší odchylku, a to 0,74 %, což už není tak velká chyba, ale stále se podařilo najít lepší místa pro měření. Největší chyba byla opět v okolí clonky spektrometru, která dosáhla 16,6 %.

Obecně na základě naměřených hodnot se dá říct, že oproti základní poloze svítidla s úzkou vyzařovací charakteristikou, kdy svítí do bodu C0/ $\gamma$ 0 se mohou najít lepší oblasti, kam svítidla namířit. Jako dobré oblasti se ukázaly na polokouli, kde je umístěn spektrometr, ale jen v místech, která jsou vzdálenější od clonky spektrometru, protože v jejím blízkém okolí jsou hodnoty silně přeměřené. Závěrem lze konstatovat, že polohovat svítidlo, aby svítlo na polokouli, kde se nachází clonka s korekční žárovkou nelze doporučit, z důvodu podměřených hodnot na této polokouli a tím pádem i vyšší nejistotě měření.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [3] Radiometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky*. online: Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/536-radiometricke-veliciny>
- [4] Solid-angle. In: *Followtheart*. online: Hesed.info, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/images/solid-angle.png>
- [5] Rovinný úhel a prostorový úhel. *Encyklopedie fyziky*. online: Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1306-rovinny-uhel-a-prostorovy-uhel>
- [6] Absolutní citlivost oka v závislosti na druhu vidění. In: *Přístrojová a optická sekce: České astronomické společnosti*. online: Boris Glos, 2018 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <http://posec.astro.cz/images/MEZOPIC.jpg>
- [7] Vše o světle: Veličiny proměření světla. *Fotoroman*. online: ing. Roman Pihan., 2012, 2012 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/tech2/svetlo15photometry.htm>
- [8] Historie světelného toku. In: *Standardpro*. online: standardpro, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: [https://www.standardpro.com/wp-content/uploads/2016-07-28-History-of-luminous-flux\\_Linkedin\\_EN.jpg](https://www.standardpro.com/wp-content/uploads/2016-07-28-History-of-luminous-flux_Linkedin_EN.jpg), obrázek upraven do češtiny a údaje zpřesněny
- [9] Intenzita osvětlení. *Rybicky.net*. online: rybicky, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://rybicky.net/clanky/1297>
- [10] Teplota chromatičnosti. *T-led*. online: T-led, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/info/barva-svetla.html>
- [11] Index podání barev Ra. *LEDme: led lighting solutions*. online: LEDme, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: [https://ledme.cz/textove-novinky/6\\_co-znamenau-led-hodnota-cri.html](https://ledme.cz/textove-novinky/6_co-znamenau-led-hodnota-cri.html)
- [12] *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1998-, 2009(3). ISSN 1212-0812.
- [13] Výroba el. napětí/proudu: Fotodioda. *Elektrina a magnetismus*. online: Jaromír Kekule, 2004 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: [http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden\\_prechod/fotodioda.html](http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/fotodioda.html)
- [14] Fotodioda. In: *ELUC* [online]. Olomouc: KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK, 2009 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/20848/content\\_fotodioda.png](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/20848/content_fotodioda.png)
- [15] The goniometer types A / B / C. *Instrument systems*. online: Konica Minolta group, <http://www.optronik.de/en/> [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://www.optronik.de/en/products/goniophotometers/goniometer-types-abc/>
- [16] CCD - základní princip. *Encyklopedie fyziky*. online: Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, 2018 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>

- [17] CCD. *Moravské přístroje CCD: Kamery pro astronomii* [online]. Zlín: Moravské přístroje, 2011 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.gxccd.com/art?id=303&lang=405>
- [18] *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1998-, 2009(4). ISSN 1212-0812.
- [19] Measuring the world of light (part 2). *Instrument systems*. online: Instrument System, 2014 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: [https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Presse/Fachartikel/LICHT\\_3\\_2015\\_EN.pdf](https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Presse/Fachartikel/LICHT_3_2015_EN.pdf)
- [20] Světelná technika. *Ústav elektroenergetiky* [online]. Brno: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D., 2013 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: [http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK\\_ePower/MSVT/Ucebni\\_text\\_MS\\_VT.pdf](http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MSVT/Ucebni_text_MS_VT.pdf)
- [21] Integrating Sphere Radiometry and Photometry. *Labsphere*. online: labsphere, 2017 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: [https://www.labsphere.com/site/assets/files/2550/radiometry\\_and\\_photometry\\_tech\\_guide-1.pdf](https://www.labsphere.com/site/assets/files/2550/radiometry_and_photometry_tech_guide-1.pdf)
- [22] Theoretical background: Spectrometers. *Avantes: enlightening spectroscopy* [online]. Oude Apeldoornseweg 28 NL-7333 NS APELDOORN The Netherlands, Europe: Avantes BV, 1993 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/support/theoretical-background/spectrometers>
- [23] Svítidlo. *ESVETLO.cz*. online: eSVETLO, 2018 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.esvetlo.cz/nastenne-svitidlo-netito-vzhled-sadry-pretiratelne-light-impressions/>
- [24] Uniform light source applications. *Labsphere*. online: labsphere, 2008 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2552/a-guide-to-integrating-sphere-uniform-light-source-applications.pdf>
- [25] Radiometry and photometry tech guide-1. *Labsphere*. online: labshere, 2017 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: [https://www.labsphere.com/site/assets/files/2550/radiometry\\_and\\_photometry\\_tech\\_guide-1.pdf](https://www.labsphere.com/site/assets/files/2550/radiometry_and_photometry_tech_guide-1.pdf)
- [26] Goniofotometr Rigo801. *Direct Industry*. online: Direct Industry, 2018 [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/technoteam-bildverarbeitung-gmbh/product-63849-417114.html>
- [27] Užití elektrické energie Světelné zdroje a osvětlování. Brno, 2013.
- [28] NIST Special Publication 250-95. Gaithersburg, MD 20899, 2018.